

Влияние эффекта „накопления“ на процесс образования многозарядных ионов при многократном облучении твердых тел лазером при скользящем падении

© М.Р. Бедиллов, Р.М. Бедиллов, А.Р. Матназаров, М.М. Сабитов, Ж.О. Камалова

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

E-mail: bedilov@yandex.ru

(Поступила в Редакцию 20 июня 2005 г.)

В окончательной редакции 18 января 2006 г.)

Масс-спектрометрическим методом изучено влияние эффекта „накопления“ на оптически непрозрачное твердое тело в зависимости от числа и угла падения лазерных импульсов. Установлено, что в допороговой ($10^8 - 10^9 \text{ W/cm}^2$) области q лазера независимо от угла падения ($\alpha = 18 - 85^\circ$) излучения лазера и в сверхпороговой ($q > 10^{10} \text{ W/cm}^2$) области при скользящем падении ($\alpha = 85^\circ$) излучения лазера отчетливо видна роль эффекта „накопления“ в увеличении максимальной кратности заряда (Z_{max}) ионов W , а также уменьшение количества и интенсивности примесных ионов. При угле падения ($\alpha = 18^\circ$) излучения лазера в сверхпороговой области эффект не обнаружен.

Работа выполнена при поддержке Центра науки и технологий Республики Узбекистан (грант № Ф-2.1.73).

PACS: 78.40.Kc, 78.90.+t

Успех в создании эффективных источников многозарядных ионов лучом лазера, нелинейно-оптических сред, элементов и устройств термоядерного реактора, работающих в экстремальных условиях, во многом определяется исследованием и разработкой лучестойких твердых материалов. Известно, что создание таких материалов в основном зависит от знания механизмов их разрушения под действием излучения лазера. Заметим, что поверхность твердого тела в процессе лазерного облучения разрушается при достижении определенной (пороговой) плотности мощности излучения лазера. Отметим, что, несмотря на значительное число работ по исследованию влияния эффекта „накопления“ на процесс лазерного разрушения поверхности оптических материалов (стекло, кристаллы, полимеры) [1–4], вопрос лазерного разрушения оптически непрозрачных (металлов и др.) твердых тел остается малоизученным. Характерно то, что лазерная прочность прозрачных диэлектрических материалов в режиме многократного облучения обычно существенно ниже их лазерной прочности при моноимпульсном облучении. При этом физические причины снижения прочности материалов могут быть связаны как с вероятностной природой разрушения, так и с накоплением необратимых изменений в диэлектрике [2,4], а также с поглощающими включениями и дефектами материалов [3,4] под действием излучения лазера.

Настоящая работа посвящена выявлению роли эффекта „накопления“ в оптически непрозрачном твердом теле под действием излучения лазера с помощью регистрации ионизационного состава ионов, эмитированных с поверхности твердых тел при многократном облучении. Исследования проводились методами масс-спектрометрии и оптической микроскопии [5], так как процесс лазерного разрушения твердого тела и образование

плазмы взаимосвязаны. Это дает возможность рассмотреть влияние „накопления“ на морфологию разрушения и на ионизационный состав плазмы в зависимости от плотности мощности, числа и угла падения излучения лазера. Эксперименты проводились на лазерном масс-спектрометре [5], который состоит из следующих узлов: лазерная система, камера источника ионов, времяпролетный анализатор с электростатическим сепаратором, вакуумная камера, контрольно-регистрирующая аппаратура. Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В опытах использовался лазер на основе стекла с Nd^{3+} , энергией 5.0J и длительно-

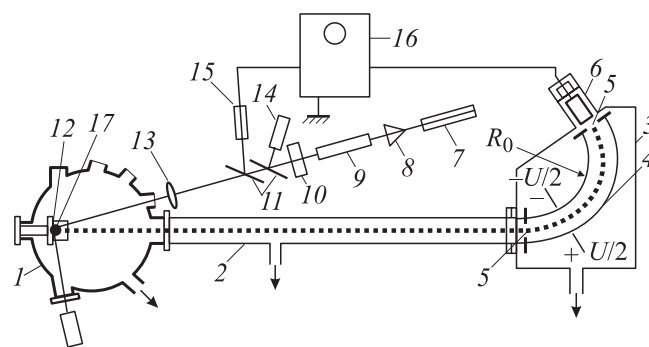


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки. 1 — многофункциональная камера мишеней, 2 — времяпролетный масс-анализатор, 3 — камера электростатического анализатора, 4 — электростатический энергоанализатор, 5 — входная и выходная щели, 6 — детектор ионов, 7 — He-Ne лазер, 8 — модулятор, 9 — твердотельный лазер, 10 — 50% зеркало, 11 — плоскопараллельные пластины, 12 — мишень, 13 — фокусирующая линза, 14 — калориметр, 15 — ФЭК, 16 — двулучевой осциллограф, 17 — лазерная плазма.

стью импульса излучения 50 ns, что дало возможность получить на поверхности мишени плотность мощности излучения $q_{\max} = 10^{12} \text{ W/cm}^2$. Разброс по энергиям излучения лазера составлял 10–15%. Экспериментально имеется возможность вращать лазерную систему вокруг камеры источника ионов. Камера источника ионов обеспечена устройством для размещения и перемещения пакета исследуемых мишеней. На него можно одновременно направлять до 10 штук мишеней в виде таблетки диаметром 10 mm и толщиной 2–3 mm. В качестве мишеней был использован W. По паспорту пластинки из W в wt.% имеют: 98.59 (W), 0.41 (C), 0.17 (O), 0.13 (N), 0.25 (S), 0.15 (K), 0.14 (Na), 0.12 (Co); другие примеси (Al, Ni, Fe) меньше $10^{-4} \text{ wt.}\%$ (ниже чувствительности данного масс-спектрометра). Элементный состав пластинок также контролировался активационным анализом: полученные данные на хорошем уровне согласуются с паспортными данными. Кроме того, в качестве мишеней можно использовать металлы, сверхпроводники, полупроводники и диэлектрики. Устройство позволяет, не нарушая вакуум в камере, менять мишени как при однократном, так и многократном воздействии мощного излучения лазера на поверхность твердого тела. Геометрия и технология управления мишенного устройства позволяют получать информацию об образовании ионов и локальных микропримесей в зависимости от угла падения, плотности мощности излучения лазера, а также можно получать данные о морфологии разрушения мишени при однократном и многократном воздействии излучения лазера.

В камере, сбоку, имеются несколько оптических окон для ввода мощного излучения лазера, юстировки оптических систем, очистки поверхности исследуемой мишени CO_2 лазером, а также система для вывода пучка ионов в масс-спектрометр. Для анализа ионизационного состава и энергетических спектров ионов лазерной плазмы на некотором расстоянии от мишени применялась анализирующая система, состоящая из динамического времяпролетного анализатора длиной 150 cm и электростатического сепаратора с разрешающей способностью по массе 100, которая позволяла исследовать как тепловые [6], так и ускоренные многозарядные ионы [7] в широком энергетическом интервале. Динамический времяпролетный анализатор осуществляет разделение ионов по скоростям при разлете плазмы в вакууме, уменьшает плотность плазмы до $< 10^9 \text{ cm}^{-3}$, при которой возможен разрыв плазмы (электронов и ионов) электрическим полем анализатора, и уменьшает плотность тока в анализаторе до $< 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, исключая тем самым возможность влияния объемного заряда пучка ионов после разрыва плазмы. Относительные и абсолютные чувствительности масс-спектрометра составляют $10^{-4} \text{ wt.}\%$ и 10^{-12} g соответственно, а вакуум в системе 10^{-9} Торг достигался с помощью форвакуумных (с азотным охлаждением) и высоковакуумных насосов (цеолитовый и НМД). Контрольно-регистрационная аппаратура включает в себя детекторы ионов типа ВЭУ-1А

с коэффициентом усиления 10^6 . Электронный сигнал с ВЭУ-1А подавался на вход двулучевого осциллографа (С1-57, С8-12). С экрана осциллографа ионизационный состав плазмы и импульс излучения лазера снимались на фотопленку РФ-1000. Надежность получаемых данных в основном зависит от начального условия опыта и мощности излучения лазера. Поэтому в камеру помещали 10 мишеней и, сохраняя начальные условия опыта (угол падения, плотность мощности излучения лазера, вакуум в системе и др.), проводили пять циклов экспериментов. Полученные данные усредняли с использованием ЭВМ.

Для определения порога разрушения, сопровождающегося свечением и выбросом ионизированной массы, на W-мишени воздействовали излучением лазера, последовательно увеличивая плотность мощности излучения (при двух значениях углов падения $\alpha = 18$ и 85°). Момент начала разрушения фиксировался масс-спектрометрическим методом по появлению ионных пиков. Масс-спектрометром также производилось разделение по массе, заряду и энергии ионных компонентов плазмы. Относительная ошибка измерений амплитуды ионных сигналов не превышала $\sim 8\%$.

Экспериментально получены данные о влиянии эффекта „накопления“ на процесс лазерного разрушения W-мишени и об образовании многозарядных ионов при многократном облучении. При этом эффект „накопления“ имеет место как в допороговой ($q = 10^8 - 10^9 \text{ W/cm}^2$), так и в сверхпороговой ($q > 10^{10} \text{ W/cm}^2$) области плотности мощности излучения лазера, а также зависит от угла падения ($\alpha = 18 - 85^\circ$) 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 ($q = 5 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$) области независимо от угла падения излучения лазера эффект „накопления“ проявляется с пятого выстрела (с первого по четвертый выстрел лазера ионные сигналы не зарегистрированы), 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 по интенсивности (рис. 2, а). Следовательно, благодаря эффекту „накопления“ с появлением на ионизационном составе ионов W^{1+} плазмы при многократном облучении на поверхности W-мишени наблюдается лазерное разрушение длиной 5 mm и шириной 0.5 mm.

В сверхпороговой области ($q > 10^{10} \text{ W/cm}^2$) 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 $q = 5 \cdot 10^{11} \text{ W/cm}^2$ увеличена максимальная кратность заряда ионов W с $Z_{\max} = 3$ до $Z_{\max} = 4$ (рис. 2, б). Характерно, что при последовательном воздействии на одно и то же место

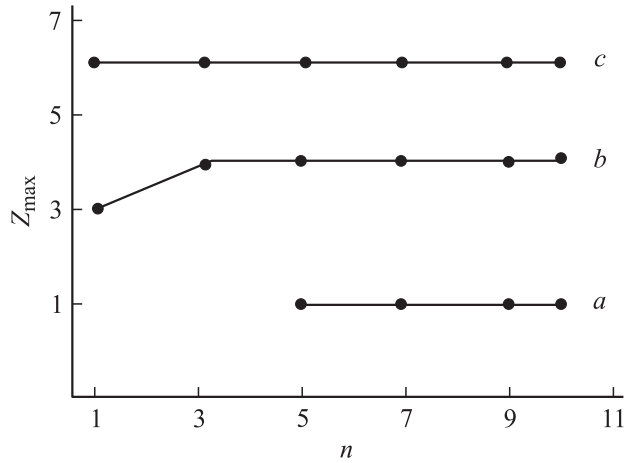


Рис. 2. Зависимость максимальной кратности заряда Z_{\max} ионов W от количества выстрелов излучения лазера, где *a* — допороговая область $q = 5 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$ при $\alpha = 18$ и 85° ; *b* — сверхпороговая область $q = 5 \cdot 10^{11} \text{ W/cm}^2$ при $\alpha = 85^\circ$; *c* — сверхпороговая область $q = 5 \cdot 10^{11} \text{ W/cm}^2$ при $\alpha = 18^\circ$.

импульсов излучения лазера на W-мишень под углом $\alpha = 85^\circ$ уменьшаются 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+} и 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 (рис. 3, *a-d*). При этом размер (длина и ширина) лазерного разрушения на поверхности W остается как 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 $Z_{\max} = 6$ (рис. 2, *c* и 3, *e*) и примесный состав C^{1+} , O^{1+} сохраняются. Следовательно, после многократного облучения на поверхности W-мишени образуется локальное разрушение — лунка с диаметром $33 \mu\text{m}$ при $\alpha = 18^\circ$ и $q = 5 \cdot 10^{11} \text{ W/cm}^2$. 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 края.

На основе полученных спектров ионов W и примесей в допороговой и сверхпороговой областях плотности мощности излучения лазера построены их энергетиче-

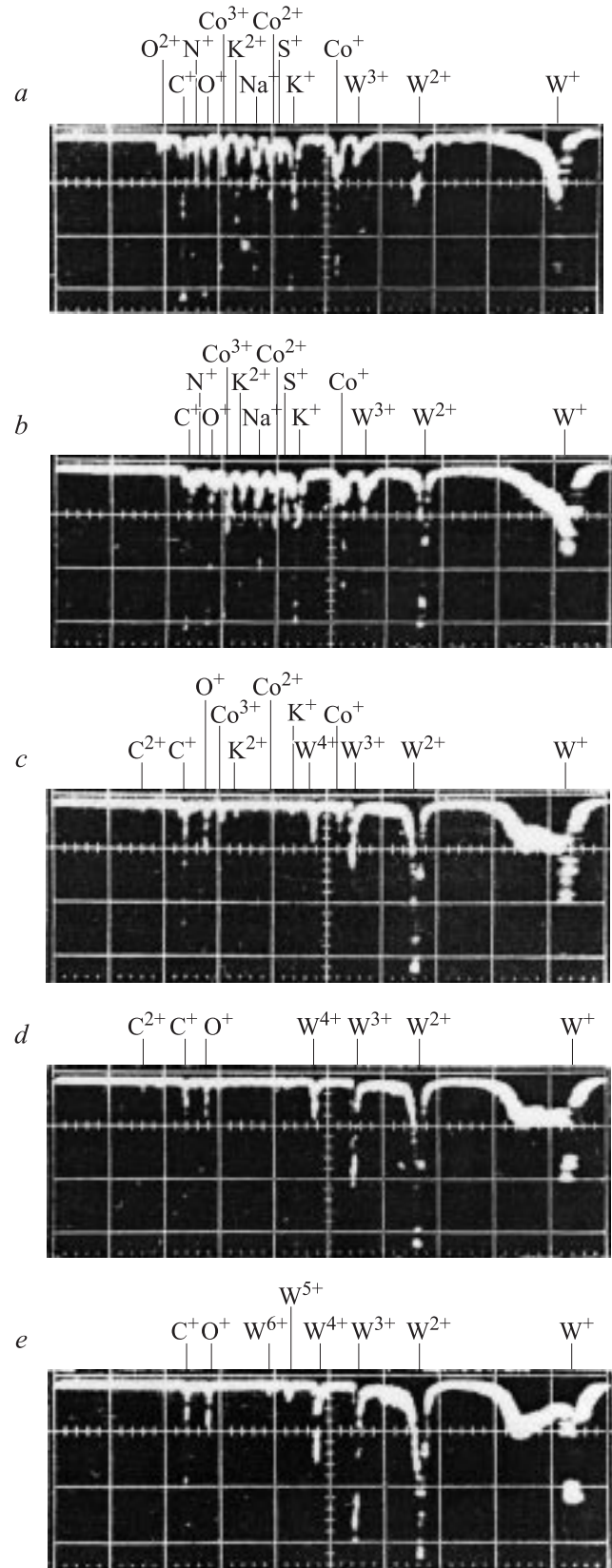


Рис. 3. Состав ионов W и примесей на поверхности W для первого (*a*), второго (*b*), третьего (*c*) и четвертого (*d*) импульсов излучения при угле падения луча $\alpha = 85^\circ$ и ионизационный состав, соответствующий $\alpha = 18^\circ$, при десяти актах воздействия лазерного излучения (*e*).

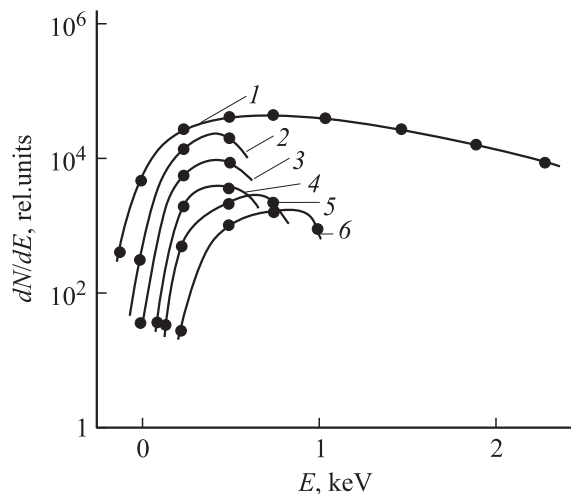


Рис. 4. Энергетические спектры ионов примесей на поверхности W , образованные под действием излучения лазера с параметрами: $\alpha = 85^\circ$, $q = 5 \cdot 10^{11} \text{ W/cm}^2$, где кривые 1–6 соответствуют ионам C^{1+} , O^{1+} , Na^{1+} , S^{1+} , K^{1+} , Co^{1+} .

ские спектры. Энергетический спектр ионов W^{1+} , образованный в допороговой области благодаря эффекту „накопления“, имеет довольно узкий диапазон (50–500 eV) 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 eV и 1.0 keV соответственно, в то время как при $\alpha = 18^\circ$ E_{max} этих ионов ($W^{1+} - W^{6+}$) достигает $\sim 4.0 \text{ keV}$. 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 (рис. 4) 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 1.0 keV.

Остановимся на интерпретации полученных результатов. В начале о зависимости эффекта „накопления“ от угла падения излучения лазера на поверхность мишени. Когда излучение лазера сфокусировано на поверхность мишени под острым углом ($\alpha = 18^\circ$), при сверхпороговой области ($q > 10^{10} \text{ W/cm}^2$) и длительности излуче-

ния 10^{-8} s 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 $v < 10^8 \text{ cm/s}$ 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, 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 эффекту „экранирования“ поверхности мишени плазмой от излучения лазера эффект „накопления“ в сверхпороговой области не обнаружен.

При скользящем ($\alpha = 85^\circ$) падении излучения лазера на поверхность W как в допороговой, так и сверхпороговой области q лазера наблюдается роль эффекта „накопления“ в образовании многозарядных ионов W и примесей. Также экспериментально установлено, что с ростом плотности мощности излучения лазера величина испаренной массы с поверхности W увеличивается из-за отсутствия эффекта „экранирования“ поверхности мишени плазмой от излучения лазера. Кроме того, многократное облучение мишени импульсами лазера приводит к образованию дополнительно W^{1+} ионов в допороговой области, а в сверхпороговой области к образованию ионов W^{4+} и при этом 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 результаты работ [4,8] по воздействию излучения лазера на оптически прозрачные (силикатное стекло) и оптически непрозрачные (металлы) твердые тела показали, что при многократном облучении мощным излучением лазера обоих материалов наблюдается эффект „накопления“. Эффект „накопления“ в различных твердых телах имеет как общие черты, так и отличия. Общие черты эффекта „накопления“ конкретно проявляются, в частности, в следующих характеристиках: наблюдается необратимое разрушение твердого тела лучом лазера; разрушение носит пороговый характер; изменяется лучевая стойкость, объем и количество испаряемого вещества. При этом наблюдаются следующие различия. В случае оптического материала с увеличением количества импульсов лазера (на одно и то же место мишени) увеличиваются объем разрушения и количество испаряемого вещества, уменьшается порог разрушения, лучевая стойкость и ионизационный состав плазмы, разрушение

по характеру переходит от поверхностного к объемному. В случае металла W (оптически непрозрачного) уменьшаются объем разрушения, количество испаряемого вещества и количество ионизационного состава примесей, увеличиваются 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 излучения лазера, так как в зоне действия излучения лазера вещество закаливается лучом и теплом с ростом количества импульсов лазера. Следовательно, благодаря эффекту „накопления“ при многократном облучении W-мишени излучением лазера, происходит уменьшение объема и количество испаряемого вещества, что 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 заключение 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 областях плотности мощности лазера, не прикладывая дополнительной энергии излучения лазера.

Список литературы

- [1] М.Ф. Колдунов, А.А. Маненков, И.Л. Покатило. Квантовая электрон. **22**, 7, 701 (1995).
- [2] В.П. Крутянова, В.Н. Смирнов. ЖТФ **49**, 2647 (1979).
- [3] А.А. Маненков, Г.А. Матюшкин, В.С. Нечитайло, А.М. Прохоров. Изв. АН СССР. Сер. физ. **52**, 1788 (1988).
- [4] М.Р. Бедилов, Х.Б. Бейсембаева, И.Ю. Давлетов. ФТТ **44**, 6, 1048 (2002).
- [5] М.Р. Бедилов, К. Хаитбаев. ПТЭ **6**, 139 (1996).
- [6] М.Р. Бедилов, И.Ю. Давлетов, М.С. Сабитов, Г.Р. Бердиев, Т.Г. Цой. Квантовая электрон. **31**, 5, 453 (2001).
- [7] М.Р. Бедилов, И.Ю. Давлетов, Ш.Д. Султанов. Физика плазмы **28**, 12, 1124 (2002).
- [8] М.Р. Бедилов, Х.Б. Бейсембаева, И.Ю. Давлетов. ЖТФ **72**, 8, 89 (2002).