

УДК 66.023.2

https://doi.org/10.33619/2414-2948/58/19

**МОДЕРНИЗИРОВАННАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА  
ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ И ИССЛЕДОВАНИЯ  
МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ**

©*Матназаров А. Р.*, канд. физ.-мат. наук, Ургенчский государственный университет,  
г. Ургенч, Узбекистан, a\_matnazarov@mail.ru

©*Давлетов И. Ю.*, д-р физ.-мат. наук, Ургенчский государственный университет, г. Ургенч,  
Узбекистан, idavletov66@gmail.com

©*Жапаров А. И.*, Ургенчский государственный университет, г. Ургенч, Узбекистан,  
ajaraqov@gmail.com

**UPGRADED EXPERIMENTAL APPARATUS FOR THE DETECTION AND  
INVESTIGATION OF MULTIPLY CHARGED IONS OF A LASER PLASMA**

©*Matnazarov A.*, Ph.D., Urgench State University, Urgench, Uzbekistan, a\_matnazarov@mail.ru

©*Davletov I.*, Sc.D., Urgench State University, Urgench, Uzbekistan, idavletov66@gmail.com

©*Japakov A.*, Urgench State University, Urgench, Uzbekistan. ajaraqov@gmail.com

*Аннотация.* В статье приведены данные по модернизированной экспериментальной установке для исследования взаимодействия излучения лазера с твердыми телами при различных углах падения. Для регистрации и исследования спектра ядер исследуемых элементов был использован твердотельный неодимовый лазер, работающий в моноимпульсном режиме.

*Abstract.* The article analyses about the usage of a modernized experimental setup for studying the interaction of laser radiation with solids at different angles of incidence. To register and investigation the spectrum of the nuclei in the elements under study, a solid-state neodymium laser operating was used in a mono-pulse mode.

*Ключевые слова:* лазер, масс-спектрометр, атом, ядро, спектр, параметр, плазма, заряд, мишень, легких элементов, рекомбинация, излучения, многозарядные ионы.

*Keywords:* laser, mass-spectrometry, atom, nucleus, spectrum, parameter, plasma, charge, target, radiation, recombination, multiply charged ions.

Модернизация экспериментальной установки для исследования взаимодействия скользящего излучения лазера с поверхностью твердых тел, проведено сравнительное исследование процессов образования масс-зарядовых, энергетических и других характеристик лазерной плазмы, получаемой при углах падения излучения лазера  $\alpha=18^\circ$  и  $85^\circ$ . Идентифицированы масс-зарядовые спектры ионов лазерной плазмы, получаемые в зависимости от плотности мощности и углов падения излучения лазера. Установка позволяла получать и изучать особенности формирования спектра многозарядных ионов лазерной плазмы, образованных при скользящем падении излучения лазера. Также разработанная

установка применялась для обнаружения эффекта «накопления» при многократном облучении скользящим излучением лазера поверхности мишени. Отметим, что в экспериментальной установке использован неодимовый лазер с плотностью мощности  $q=10^8-10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup>, который собран в лабораторных условиях. Экспериментальная установка состояла в основном из следующих узлов: лазерного масс-спектрометра, твердотельной лазерной системы, универсальной мишенной камеры, вакуумной системы, регистрирующей системы и др. Принципиальная схема модернизированной экспериментальной установки скользящим падением излучения лазера на мишень приведена на Рисунке.

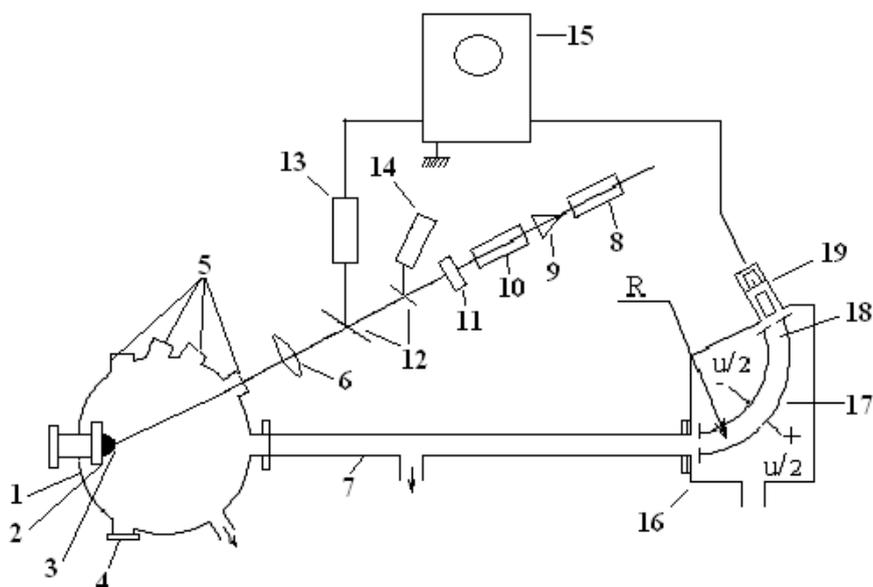


Рисунок. Принципиальная схема экспериментальной установки со скользящим падением излучения лазера на мишень: 1 — вакуумная камера, 2 — мишень, 3 — лазерная плазма, 4 — окно, 5 — окошки для входа луча лазера под различными углами, 6 — оптическая линза, 7 — времяпролетный анализатор, 8 — газовый лазер ЛГ-126, 9 — модулятор света, 10 — твердотельный неодимовый лазер, 11 — 50% прозрачное зеркало, 12 — плоскопараллельные пластины, 13 — ФЭК, 14 — колориметр, 15 — двухлучевой осциллограф, 16 — камера электростатического анализатора, 17 — электростатический сепаратор, 18 — цель анализатора, 19 — ВЭУ-1 А для регистрации ионов плазмы.

Для исследования особенностей формирования масс-зарядовых, энергетических спектров многозарядных ионов лазерной плазмы применялся времяпролетный анализатор, соединенный с электростатическим масс-спектрометром. При этом времяпролетный анализатор с длиной 150 см использовался для: разделения ионов по скоростям при разлете плазмы в вакуум; уменьшения плотности плазмы до  $10^9$  см<sup>-3</sup>, при которой возможен разрыв плазмы электрическим полем масс-спектрометра; уменьшения плотности ионного тока в масс-спектрометре до  $10^{-7}$  А/см<sup>2</sup> для исключения возможности влияния объемного заряда пучка ионов после разрыва плазмы на электростатическом поле масс-спектрометра. Нами модернизирована вакуумная камера и лазерная система для исследования многозарядных ионов, образованных при углах падения излучения лазера  $\alpha=180$  и  $850$  на поверхность твердого тела.

В разработанной экспериментальной установке длина времяпролетного анализатора была выбрана из условия допустимого разрешения по скоростям и необходимой чувствительности детектора. Из следующего соотношения  $V=L/t$  следует, что относительная

погрешность измерения скорости  $\Delta V/V = \Delta L/L + \Delta t/t$ . Задавая ошибку измерения не более 1% при  $V = 108$  см/с и точности измерения  $\Delta L = 10^{-1}$  см, получим для необходимого временного разрешения регистрации  $\Delta t \leq 10^{-2} L/V \cdot 10^{-8}$  с.

При переходе от времяпролетного анализатора к электростатическому масс-спектрометру находится щель  $S_1$ . Масс-спектрометр представляет собой цилиндрический конденсатор с радиальным электрическим полем, угол отклонения которого  $\varphi = 1270$  17', что обеспечивает фокусировку первого порядка [1]:

$$\Phi(r) = \frac{u_2 - u_1}{\ln r_2 / r_1} \ln r - \frac{u_1 \cdot \ln r_2 - u_2 \cdot \ln r_1}{\ln r_2 / r_1} \quad (1)$$

Эквипотенциалы этого поля представляют собой окружности, совпадающие с некоторым эквипотенциалом  $u_0$

$$r_0 = r_1^{u_2 - u_0} \cdot r_2^{u_0 - u_1} \quad (2)$$

В экспериментах применялось симметрическое питание  $u_1 = -u_2 = u$ . При  $u_0 = 0$

$$r = \sqrt{r_1 \cdot r_2} \quad (3)$$

т. е. при симметричном питании радиус нулевого эквипотенциала равен среднему геометрическому радиусу цилиндров. При малых расстояниях между цилиндрами:

$$r_0 = \frac{1}{2}(r_1 + r_2) \quad (4)$$

Определим энергию настройки анализатора. Сила, действующая на частицу, находящуюся в радиусе  $r$ , равна по величине:

$$|Z_e E_r| = \frac{Z \cdot e}{d} \cdot \frac{u_2 - u_1}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (5)$$

Данная сила направлена к оси цилиндров и не зависит от угла. Для того, чтобы частица, вылетающая по касательной к окружности радиуса  $r$ , двигалась по ней, должно выполняться соотношение:

$$\frac{mV_0^2}{r} = \frac{Z \cdot e}{d} \cdot \frac{u_2 - u_1}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (6)$$

Отсюда находим энергию настройки анализатора

$$E = \frac{mV_0^2}{2} = \frac{Z \cdot e(u_2 - u_1)}{2 \cdot \ln r_2 / r_1} \quad (7)$$

Для нашего разработанного анализатора  $r_1=11$  см,  $r_2 = 9$  см,  $d=2$  см. Верхний предел энергии  $E/Z$  при электростатическом анализаторе определяется значением  $2 \cdot u/d$ , при котором может быть приложено напряжение к пластинкам без возникновения электрических пробоев. Предельное значение напряженности поля составляет  $\sim 1,0$  кВ/см [1], что для нашего случая соответствует энергии однократно заряженного иона, равной 10 кэВ. Нижняя граница энергии составляет несколько эВ и определяется наличием рассеянных магнитных полей и переходной областью между магнитным полем и анализатором. Заметим, что точность определения энергии с помощью электростатических анализаторов обычно составляет 1% [1], причем в области низких энергий она ограничена магнитными возмущениями, коллимацией и конструктивными характеристиками цилиндрических электродов (краевыми электрическими и магнитными полями).

При фиксированной напряженности поля  $E$  для таких анализаторов:

$$\frac{\Delta E}{E} \approx \frac{S_2}{r} \quad (8)$$

где  $S_2$  — ширина выходной щели. Отсюда видно, что при постоянной ширине щели, ширина полосы анализатора  $\Delta E$  пропорциональна  $E$ ,  $S_2=1$  мм составляет  $E/\Delta E = 100$ .

Разрешающая способность по массам может быть записана в виде:

$$R_m = \frac{t}{2\Delta t} = \frac{m}{\Delta m},$$

где  $t$  — время пролета ионов с массой, которая еще может быть разрешена от соседней массы без учета аббераций;  $\Delta t$  — длительность ионного пакета вблизи детектора  $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4$ .

Основными погрешностями, определяющими длительность ионного пакета, являются следующие:  $\Delta t_1$  обусловлен расходимостью пучка ионов при налете на ион-спектрометр;  $\Delta t_2$  может возникнуть из-за влияния объемного заряда;  $\Delta t_3$  учитывает длительность лазерного импульса;  $\Delta t_4$  соответствует конечной ширине части энергетического спектра, вырезаемого диафрагмой.

В модернизированной экспериментальной установке регистрация ионов плазмы, образованной при взаимодействии излучения лазера с мишенью, производилась с помощью вторичного электронного умножителя ВЭУ-1А, принцип действия которого основан на вторичной электронной эмиссии. Для увеличения коэффициента усиления, между ВЭУ-1А и масс-спектрометром установлена вторичная мишень из  $\text{CuBe}$  (мишень совместно с ВЭУ-1А образует, так называемый, детектор Дэли [2]). Коэффициент вторичной эмиссии определяется энергией, зарядом и массой налетающего на первый динод ВЭУ или на вторичную мишень иона. Как показывают эксперименты [3–5], коэффициент вторичной эмиссии при плотности мощности лазерного излучения  $10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup> определяется энергией, кратностью заряда и скоростью приобретенной ионами в ускоряющем поле вторичной мишени. Вторичный электронный умножитель ВЭУ-1А имеет коэффициент усиления 105, а использование вторичной мишени из  $\text{CuBe}$  с ускоряющим напряжением на ней — 10 кВ позволило повысить коэффициент усиления до  $\sim 106$ .

В дальнейшем ионный сигнал лазерной плазмы с детектора ВЭУ-1А подавался на двухлучевой импульсный осциллограф С1-74, с экрана которого фиксировался на фотопленку.

Синхронизация лазерного излучения с осциллографом осуществлялась с помощью коаксиального фотоэлемента ФЭК-15. В качестве фотопленки использовалась РФ-3 с чувствительностью 1000 ед.

К достоинствам описанной экспериментальной установки относятся:

- применение модернизированной экспериментальной установки для исследования взаимодействия излучения лазера с твердыми телами при различных углах падения  $\alpha=180 \div 850$  луча лазера;
- высокое разрешение масс-спектрометра и добротная регистрирующая аппаратура;
- модернизированный масс-спектрометр, состоящий из времяпролетного анализатора и электростатического масс-спектрометра, позволил исследовать многозарядные ионы плазмы при различных углах падения излучения лазера, особенно при скользящем падении луча лазера.

#### Список литературы:

1. Беляев В. С. Механизм образования электронов высокой энергии в лазерной плазме // Квантовая электроника. 2004. Т. 34. №1. С. 41-46. <https://doi.org/10.1070/QE2004v034n01ABEH002577>
2. Хилд М. А., Уортон С. Микроволновая диагностика плазмы. Абакан: Атомиздат, 1968. 392 с.
3. Бедиллов М. Р., Ишмуратов А. Н. О зависимости электронной эмиссии из твердых тел от кратности заряда и скорости бомбардирующих их ионов // Физика твердого тела. 1996. Т. 38. №6. С. 1649-1652.
4. Бедиллов М. Р., Бейсембаева Х. Б., Сабитов М. С., Холбаев А., Султанов Ш. Д., Ишмуратов А. Н., ... Тожихонов Э. Н. Фундаментальные и прикладные аспекты многозарядных ионов и ядер лазерной плазмы // Конференция посвященная Году Физики - 2005 (г. Ташкент, 27-28 сентября 2005 г.). Ташкент. 2005. С. 62-63.
5. Ишмуратов А. Н. Генерация электронов и ионов из твердых тел под воздействием многозарядных ионов и ядер лазерной плазмы: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 1987.

#### References:

1. Belyaev, V. S. (2004). Mechanism of high-energy electron production in a laser plasma. *Quantum Electronics*, 34(1), 41-46. (in Russian). <https://doi.org/10.1070/qe2004v034n01abeh002577>
2. Khild, M. A., & Uorton, S. (1968). *Mikrovolnovaya diagnostika plazmy*. Abakan, Atomizdat, 392. (in Russian).
3. Bedilov, M. R., & Ishmuratov, A. N. (1996). O zavisimosti elektronnoi emissii iz tverdykh tel ot kratnosti zaryada i skorosti bombardiruyushchikh ikh ionov. *Fizika tverdogo tela*, 38(6), 1649-1652. (in Russian).
4. Bedilov, M. R., Beisembayeva, Kh. B., Sabitov, M. S., Kholbaev, A., Sultanov, Sh. D., Ishmuratov, A. N., ... & Tozhikhonov, E. N. (2005). Fundamental'nye i prikladnye aspekty mnogozaryadnykh ionov i yader lazernoi plazmy. In *Konferentsiya posvyashchennaya Godu Fiziki - 2005 (g. Tashkent, 27-28 sentyabrya 2005 g.)*, Tashkent. 62-63. (in Russian).

5. Ishmuratov, A. N. (1987). Generatsiya elektronov i ionov iz tverdykh tel pod vozdeistviem mnogozaryadnykh ionov i yader lazernoi plazmy: authoref. Ph.D. diss. Moscow. (in Russian).

*Работа поступила  
в редакцию 11.08.2020 г.*

*Принята к публикации  
17.08.2020 г.*

*Ссылка для цитирования:*

Матназаров А. Р., Давлетов И. Ю., Жапаков А. И. Модернизированная экспериментальная установка для регистрации и исследования многозарядных ионов лазерной плазмы // Бюллетень науки и практики. 2020. Т. 6. №9. С. 198-203. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/58/19>

*Cite as (APA):*

Matnazarov, A., Davletov, I., & Japakov, A. (2020). Upgraded Experimental Apparatus for the Detection and Investigation of Multiply Charged Ions of a Laser Plasma. *Bulletin of Science and Practice*, 6(9), 198-203. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/58/19>