

Научная статья

УДК 533.9.082.7

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-88-94

О влиянии условий фокусировки на эмиссионную способность лазерно-плазменного источника ионов*

Евгений Дмитриевич Вовченко¹, Константин Иванович Козловский²
Сергей Маркович Полозов³, Александр Евгеньевич Шиканов⁴
Екатерина Алексеевна Морозова⁵, Антон Алексеевич Исаев⁶

¹⁻⁵Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Москва, Россия

⁶Российский технологический университет «МИРЭА»
Москва, Россия

¹edvovchenko@mail.ru

²cozlowskij2013@yandex.ru

³SMPolozov@mephi.ru

⁴aeshikanov14@mail.ru

⁵e.a.morozova137@gmail.com

⁶isaev@lenta.ru

Аннотация

Рассмотрены вопросы влияния геометрических условий фокусировки лазерного излучения на поверхность плазмообразующей мишени лазерно-плазменного источника ионов. В частности, экспериментально установлено наличие двух максимумов ионной эмиссии в области плотности потока лазерного излучения, превышающего 1015 Вт/м^2 . Предложена возможная интерпретация этого эффекта.

Ключевые слова

лазерная плазма, инжектор, ускоритель ионов, дейтрон, плазма, ток дейтронов, лазерно-плазменный источник

Для цитирования

Вовченко Е. Д., Козловский К. И., Полозов С. М., Шиканов А. Е., Морозова Е. А., Исаев А. А. О влиянии условий фокусировки на эмиссионную способность лазерно-плазменного источника ионов // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 2. С. 88–94. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-88-94

* Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

On the Effect of Focusing Conditions on the Emission Capacity of a Laser-Plasma Ion Source

Evgeny D. Vovchenko¹, Konstantin I. Kozlovskij², Sergey M. Polozov³
Alexander E. Shikanov⁴, Ekaterina A. Morozova⁵, Anton A. Isaev⁶

¹⁻⁵National Research Nuclear University “MEPhI”
Moscow, Russian Federation

⁶Russian Technological University “MIREA”
Moscow, Russian Federation

¹edvovchenko@mail.ru

²cozlovskij2013@yandex.ru

³SMPolozov@mephi.ru

⁴aeshikanov14@mail.ru

⁵e.a.morozova137@gmail.com

⁶isaev@lenta.ru

Abstract

The issues of the influence of geometric conditions of laser radiation focusing on the surface of the plasma-forming target of a laser-plasma ion source are considered. In particular, the presence of two ion emission maxima in the region of the laser radiation flux density exceeding 1011 W/m² has been experimentally established. A possible interpretation of this effect is proposed.

Keywords

лазерная плазма, инжектор, ускоритель ионов, дейтрон, плазма, ток дейтронов, лазерно-плазменный источник

For citation

Vovchenko E. D., Kozlovskij K. I., Polozov S. M., Shikanov A. E., Morozova E. A., Isaev A. A. On the Effect of Focusing Conditions on the Emission Capacity of a Laser-Plasma Ion Source. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 2, pp. 88–94 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-88-94

Введение

В настоящее время в результате усовершенствования лазерной техники получили широкое развитие различные перспективные технологии с использованием лазерной плазмы [1; 2]. К ним относятся масс-спектрометрический элементный анализ состава вещества [1–3], инерциальный термоядерный синтез [1; 4], генерация нейтронов и мягких рентгеновских квантов [1; 5; 6], осаждение тонкопленочных покрытий [1; 7], физическое моделирование взрывных процессов [1; 8], инжектирование ионов в резонансные ускорители заряженных частиц [9–11].

Данная работа посвящена вопросам повышения эффективности лазерно-плазменного инжектора для резонансного линейного ускорителя ионов (ЛУИ) типа ПОКФ (поперечно-одно-родная квадрупольная фокусировка) [12] в части увеличения его эмиссионной способности. Для этого был проведен эксперимент с лазерно-плазменным источником дейтронов (ЛПИД), при котором плазма образовывалась при фокусировке лазерного излучения на мишень в виде таблетки из дейтерида титана с коэффициентом стехиометрии по дейтерию $\chi \sim 1$.

На рис. 1 представлена схема формирования дейтронного потока, используемая в эксперименте по физическому моделированию такого ЛПИД.

Плазма образовывалась при плотности потока лазерного излучения $q \sim (10^{14} \div 10^{16})$ Вт/м². В экспериментах использовался твердотельный лазер на гранате, активированном неодимом, генерирующий импульс излучения с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм, энергией $E_{\text{л}} \sim 1$ Дж и длительностью $\tau_{\text{л}} \sim 10$ нс. Оптическая система позволяла фокусировать излучение в пятно с радиусом, выбираемым в диапазоне $a = (2 \div 5) \cdot 10^{-4}$ м и определяющим начальный размер плазменного образования.

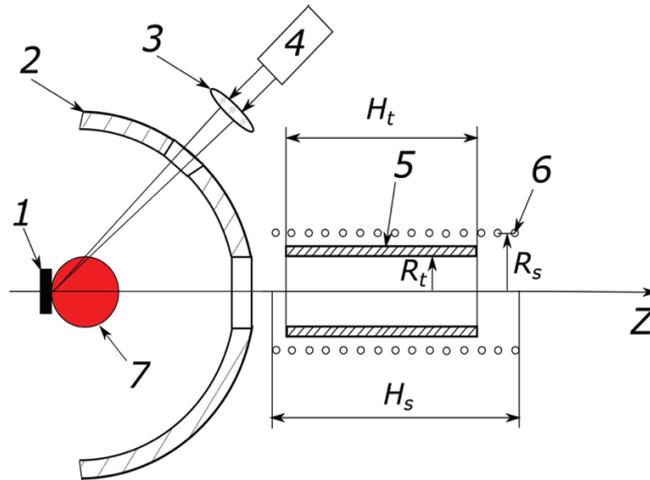


Рис. 1. Схема ЛПИД: 1 – плазмообразующая мишень; 2 – корпус вакуумной камеры; 3 – фокусирующая линза; 4 – импульсный лазер; 5 – трубка дрейфа; 6 – соленоид; 7 – лазерная плазма

Fig. 1. Diagram of a laser-plasma deuteron source: 1 – plasma-forming target; 2 – vacuum chamber housing; 3 – focusing lens; 4 – pulsed laser; 5 – drift tube; 6 – solenoid; 7 – laser plasma

Основное содержание

В монографии [1] на основе экспериментальных данных показано, что за время срабатывания лазера плазма разогревается до температуры, определяемой по формуле:

$$\theta \approx 10^{-6} q^{\frac{4}{9}} = 10^{-6} \left(\frac{E_{\text{л}}}{S\tau_{\text{л}}} \right)^{\frac{4}{9}},$$

где $S = \pi a^2$ – площадь пятна фокусировки лазерного излучения на мишень, a – радиус пятна фокусировки. При этом около, как отмечается в [1], 70 % энергии лазерной вспышки переходит в кинетическую $E_{\text{к}}$ и тепловую $E_{\text{т}}$ энергии плазмы.

Параллельно происходит одновременное увеличение скорости расширения плазменного фронта до некоторого предельного значения $V \sim 10^5$ м/с и кинематика расширения плазменного образования принимает асимптотический автомодельный характер с полем скоростей вида:

$$V(r, t) = V \frac{r}{R}, \quad (1)$$

где r – радиус-вектор, t – время, R – радиус плазменной сферы. На модельном уровне [6] можно считать, что ее центр перемещается со скоростью расширения самой сферы.

К моменту десятикратного расширения лазерной плазмы от начального размера в ней практически прекращаются столкновения частиц и происходит «закалка ионизационного состояния» [1; 3].

Следуя работам [1; 6], будем считать процесс расширения плазмы, начиная с момента $t_0 \approx 10a/V$, близким к адиабатическому с показателем $\gamma = 5/3$, полагая, в соответствии с монографиями [3; 13], выполнение следующих связей между энергетическими характеристиками плазменного сгустка:

$$E_{\text{к}} \approx 0,7 \frac{4\gamma}{(\gamma+1)^2} E_{\text{л}} = \frac{21}{32} E_{\text{л}}, \quad E_{\text{т}} \approx 0,7 \left(\frac{\gamma-1}{\gamma+1} \right)^2 E_{\text{л}} = \frac{7}{160} E_{\text{л}}.$$

На стадии полного разогрева каждая частица плазмы имеет энергию $3e\theta/2$, где e – элементарный электрический заряд. Тогда, используя принцип равномерного распределения энергии по степеням свободы и полученные выше энергетические соотношения, находим связь начального числа ионов в полностью ионизованной плазме с энергией лазерного импульса:

$$\frac{7}{160} E_{\text{л}} \approx \frac{3eN_{\text{до}}\theta}{2\chi} (2\chi + Z + 1) \text{ [эВ]},$$

где Z – порядковый номер металла-носителя мишени (в данном случае титана $Z = 22$).

Из этого выражения, с учетом коэффициента «закалки» ионизационного состояния плазмы по дейтерию $k \leq 0,1$, получаем окончательное выражение для оценки полного числа дейтронов в лазерной плазме в виде приближенной зависимости:

$$N_d \approx 3 \cdot 10^{23} k a^{\frac{8}{9}} \frac{\chi E_{\text{л}}^{\frac{5}{9}} \tau_L^{\frac{4}{9}}}{2\chi + Z + 1} \sim (10^{14} - 10^{16}). \quad (2)$$

Сделанные в соответствии с этими формулами оценки параметров плазмы дают значения в пределах $\sim (10^{15} - 10^{16})$ частиц, при указанных выше параметрах оптической системы, что находится в соответствии с экспериментальными данными, опубликованными в работах [1; 14].

Кинематика лазерной плазмы внутри вакуумной камеры определялась приближенной моделью разлета, описанной в работах [64; 15; 16]. Она предполагает линейную зависимость (1) поля скоростей от радиуса r , а также наличие четких переднего и заднего плазменных фронтов сферической формы с радиусами соответственно R_1 и R_2 , движущихся со скоростями $V_1 \sim 10^5$ м/с и $V_2 \sim 10^4$ м/с, что является следствием известных экспериментальных данных [14]. При этом дейтериевый компонент в пролетной трубе длиной $H_t \gg R_t$ опережает металлический, и их движение можно рассматривать независимо друг от друга на поздних стадиях разлета.

Как отмечалось выше, кинематическая модель предполагает, что сгусток лазерной плазмы представляет собой шар, расширяющийся со скоростью V_1 , центр которого одновременно смещается с такой же скоростью в направлении нормали к поверхности мишени, а поверхность переднего фронта плазмы задается уравнением:

$$x^2 + y^2 = R(t)^2 - [z - R(t)]^2.$$

Такое представление успешно использовалось при расчетах ускорительных трубок с лазерным источником дейтронов (см., например, [17]).

В эксперименте на вход трубки дрейфа попадало

$$N_{d1} \approx N_d \left(\frac{R_t}{R_1} \right)^2$$

дейтронов, которые замагничивались в пролетной трубе полем длинного соленоида, а извлекались с торца электрическим полем в объем коллектора (цилиндра Фарадея с входным диаметром D). Подобная методика измерений подробно описана в монографиях [2; 3]. Она позволяла собирать в коллекторе за один импульс заряд дейтронов, оцениваемый по формуле:

$$Q_d \approx N_d \left(\frac{D}{2R_1} \right)^2,$$

на уровне $\sim (10)^8$ Кл, что было вполне приемлемо для проведения эксперимента.

Заключение

В процессе эксперимента осуществлялось варьирование расстояния L между фокусирующей линзой и лазерной мишенью, определяющее условия фокусировки. На рис. 2 представлены соответствующие зависимости тока дейтронов фиксируемого цилиндром Фарадея на выходе ЛПИД от расстояния L , выражаемого в единицах фокуса линзы F .

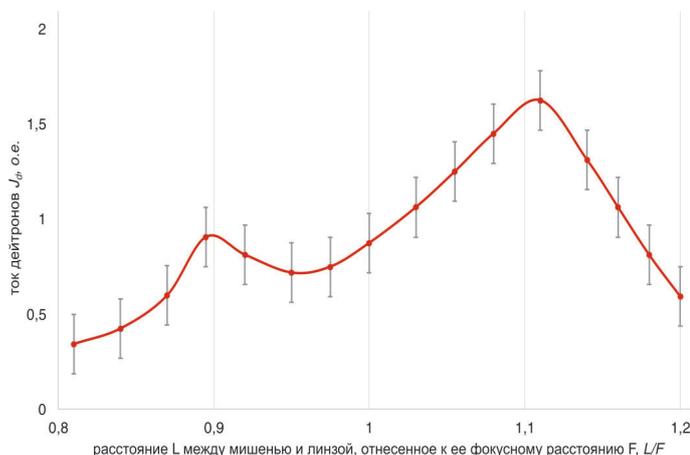


Рис. 2. Зависимости тока дейтронов на выходе ЛПИД от расстояния L между мишенью и линзой, отнесенного к ее фокусному расстоянию F

Fig. 2. Dependences of the deuteron current at the output of a laser-plasma deuteron source on the distance L between the target and the lens, related to its focal length F

Как видно из рис. 2, зависимость дейтронного потока от расстояния между линзой и лазерной мишенью имеет два максимума. Этот факт можно объяснить тем, что при их реализации разность между скоростями ионизации и рекомбинации в плазме достигает максимального значения, и реализуются оптимальные условия «заковки» ионизационного состояния плазмы, соответствующие максимальным значениям параметра $G = ka^{8/9}$. При этом больший максимум на кривой соответствует расположению линзы вблизи мишени, а меньший вдали от нее. В этом случае плотность потока лазерного излучения в области его взаимодействия с плазмой больше, чем при расположении фокуса за мишенью, что приводит к превалированию процесса ионизации над процессом рекомбинации при их конкуренции на столкновительной стадии разлета плазмы.

Кроме того, в первом случае меньше апертура лазерного луча в области оптического окна вакуумной камеры, что способствует уменьшению абберационных эффектов, вызываемых возможными неоднородностями поверхности окна и углом наклона потока излучения.

Список литературы

1. **Ананьин О. Б., Быковский Ю. А., Крохин О. Н. и др.** Лазерная плазма // Физика и применения. М.: МИФИ, 2003. 400 с.
2. **Сильнов С. М.** Лазерная плазма на поздних стадиях разлета // Эксперимент, физика, масс-спектрометрия. М.: ЧеРо. 2007. 274 С.
3. **Быковский Ю. А., Неволин В. Н.** Лазерная масс-спектрометрия. М.: Атомиздат. 1985. 130 с.
4. **Афанасьев Ю. В., Басов Н. Г.** Лазерный термоядерный синтез // Серия: Наука и человечество. М.: Знание. 1981. С. 131–151.

5. **Ananin O. B., Tsybin A. S. et al.** Prospects for developing a small neutron generator with a laser deuteron source // *Atomic Energy*. 2013. № 115(2). P. 137–141.
6. **Shikanov A. E.** Model of spherical ion diode with laser-plasma anode for neutron generation // *Plasma Physics Reports*. 2021. № 47(4). P. 377–383.
7. **Гулько В. М., Коломиец Н. Ф. и др.** Конструирование нейтронной трубки с лазерным ионным источником // *Атомная энергия*. 1982. Т. 52, вып. 4. С. 271–272.
8. **Ripin B. H., Manka C. K. et al.** Lab. laser-produced astrophysical-like plasmas // *Laser and Particle Beams*. 1990. Vol. 7. P. 183–191.
9. **Ананьин О. Б., Быковский Ю. А. и др.** Осуществление ускорения ионов лазерной плазмы на циклотроне // *Письма в ЖЭТФ*. 1973. Т. 17. Вып. 9. С. 460–463.
10. **Ананьин О. Б., Балдин А. М., Безногих Ю. Д. и др.** Об осуществлении ускорения ядер углерода, полученных в лазерном инжекторе, на синхрофазотроне Объединенного института ядерных исследований // *Квантовая электроника*. 1977. № 4(7). С. 1547–1553.
11. **Govorov A. I., Kalagin I. V., Monchinsky V. A.** Laser ion source of Synchrophasotron and Nuclotron in Dubna // *Laser and Particle Beams*. 1996. № 14(3). P. 439–442.
12. **Богданович Б. Ю., Нестерович А. В. и др.** Дистанционный радиационный контроль с линейными ускорителями. М.: Энергоатомиздат, 2009. Т. 1. 272 с.
13. **Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П.** Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М. Физматлит. 2008. 654 с.
14. **Вергун И. И., Козловский К. И., Козырев Ю. П. и др.** Исследование интенсивного лазерного источника дейтронов // *Журнал технической физики*. 1979. Т. 49, № 5. С. 2003–2006.
15. **Дыдычкин В. Н., Шиканов А. Е.** Генерация коротких (<100 нс) нейтронных импульсов в малогабаритных ускорительных трубках с лазерным ионным источником // *Атомная энергия*. Т. 70, вып. 2. 1991. С. 135–137.
16. **Вовченко Е. Д., Козловский К. И., Шатохин В. Л. и др.** Модель ускорения лазерной плазмы в полях спиральной электродинамической линии // *Письма в ЖТФ*. 2019. Т. 49, вып. 3. С. 59–62.
17. **Войтенко В. А., Гулько В. М. и др.** Ускорительная нейтронная трубка с лазерным ионным источником // *ПТЭ*. 1988. № 5. С. 34–35.

References

1. **Ananyin O. B., Bykovsky Yu. A., Krokhn O. N. et al.** Laser plasma. In: *Physics and Applications*. Moscow, МЕРНИ publ., 2003, 400 p. (in Russ.)
2. **Silnov S. M.** Laser plasma in the late stages of expansion. *Experiment, physics, mass spectrometry*. Moscow, Chero publ., 2007, 274 p. (in Russ.)
3. **Bykovsky Yu. A., Nevolin V. N.** Laser mass spectrometry. Moscow, Atomizdat publ., 1985, 130 p. (in Russ.)
4. **Afanasyev Yu. V., Basov N. G.** Laser thermonuclear synthesis. *Series "Science and humanity"*. Moscow, Znanie publ., 1981, pp. 131–151. (in Russ.)
5. **Ananin O. B., Tsybin A. S. et al.** Prospects for developing a small neutron generator with a laser deuteron source. *Atomic Energy*, 2013, no. 115(2), pp. 137–141.
6. **Shikanov A. E.** Model of spherical ion diode with laser-plasma anode for neutron generation. *Plasma Physics Reports*, 2021, no. 47(4), pp. 377–383.
7. **Gulko V. M., Kolomiets N. F. et al.** Construction of a neutron tube with a laser ion electrode. *Atomic Energy*, 1982, vol. 52, no. 4, pp. 271–272. (in Russ.)
8. **Ripin B. H., Manka C. K. et al.** Lab. laser-produced astrophysical-like plasmas. *Laser and Particle Beams*, 1990, vol. 7, pp. 183–191.
9. **Ananyin O. B., Bykovsky Yu. A. et al.** Acceleration of laser plasma ions on a cyclotron. *Letters to the JETF*, 1973, vol. 17, no. 9, pp. 460–463. (in Russ.)

10. **Ananyin O. B., Baldin A. M., Beznogikh Yu. D. et al.** On the implementation of acceleration of carbon nuclei produced in a laser injector at the synchrotron of the Joint Institute for Nuclear Research. *Quantum Electronics*, 1977, no. 4(7), pp. 1547–1553. (in Russ.)
11. **Govorov A. I., Kalagin I. V., Monchinsky V. A.** Laser ion source of Synchrotron and Nuclotron in Dubna. *Laser and Particle Beams*, 1996, vol. 14(3), pp. 439–442.
12. **Bogdanovich B. Yu., Nesterovich A. V. et al.** Remote radiation monitoring with linear accelerators. Moscow, Energoatomizdat publ., 2009, vol. 1, 272 p. (in Russ.)
13. **Zeldovich Ya. B., Raiser Yu. P.** Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena. Moscow, FIZMATLIT publ., 2008, 654 p. (in Russ.)
14. **Vergun I. I., Kozlovsky K. I., Kozyrev Yu. P. et al.** Study of an intense laser source of deuterons. *Journal of Technical Physics*, 1979, vol. 49, no. 5, pp. 2003–2006. (in Russ.)
15. **Dydychkin V. N., Shikanov A. E.** Generation of short (<100 ns) neutron pulses in small-sized accelerating tubes with a laser ion source. *Atomic Energy*, 1991, vol. 70, iss. 2, 1991, pp. 135–137. (in Russ.)
16. **Vovchenko E. D., Kozlovsky K. I., Shatokhin V. L. et al.** Model of laser plasma acceleration in the fields of a spiral electrodynamic line. *Letters to the JETP*, 2019, vol. 49, iss. 3, pp. 59–62. (in Russ.)
17. **Voitenko V. A., Gulko V. M. et al.** Accelerator neutron tube with laser ion source. *INET*, 1988, no. 5, pp. 34–35. (in Russ.)

Сведения об авторах

Вовченко Евгений Дмитриевич, кандидат физико-математических наук

Козловский Константин Иванович, кандидат физико-математических наук

Полозов Сергей Маркович, доктор физико-математических наук

Шиканов Александр Евгеньевич, доктор технических наук

Морозова Екатерина Алексеевна, студентка

Исаев Антон Алексеевич, кандидат технических наук

Information about the Authors

Evgeny D. Vovchenko, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

Konstantin I. Kozlovskij, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

Sergey M. Polozov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Alexander E. Shikanov, Doctor of Technical Sciences

Ekaterina A. Morozova, Student

Anton A. Isaev, Candidate of Technical Sciences

*Статья поступила в редакцию 19.09.2023; одобрена после рецензирования 08.12.2023;
принята к публикации 05.03.2024*

*The article was submitted 19.09.2023; approved after reviewing 08.12.2023;
accepted for publication on 05.03.2024*