

**Импульсный квазиточечный генератор нейтронов
на основе сильноточного ЭЦР-источника ионов дейтерия***С. В. Голубев, И. В. Изотов, Р. Л. Лапин, А. В. Сидоров, В. А. Скалыга,
С. В. Разин, Р. А. Шапошников*

В работе приводятся данные экспериментальных исследований фокусировки сильноточного пучка ионов дейтерия с энергией 80 кВ на дейтерийсодержащую мишень (показана возможность получения пучка с характерным поперечным размером в фокальной области на уровне 1 мм и плотностью тока более 5 А/см²) и измерений интенсивности потока нейтронов, возникающих при бомбардировке мишени за счет D-D реакции синтеза (нейтронный выход достигал 10¹⁰ нейтронов в секунду). Такой «точечный» источник нейтронов представляется перспективным для использования в нейтронной томографии.

Ключевые слова: нейтронный генератор, точечный нейтронный источник, сильноточные ионные пучки, ЭЦР разряд, гиротрон, нейтронная томография.

Ссылка: Голубев С. В., Изотов И. В., Лапин Р. Л., Сидоров А. В., Скалыга В. А., Разин С. В., Шапошников Р. А. // Прикладная физика. 2018. № 6. С. 79.

Reference: S. V. Golubev, I. V. Izotov, R. L. Lapin, A. V. Sidorov, V. A. Skalyga, S. V. Razin, and R. A. Shaposhnikov, Prikl. Fiz., No. 6, 79 (2018).

Введение

Одним из наиболее ярких и перспективных достижений ядерной физики последнего времени является нейтронография [1] и особенно нейтронная томография [1, 2], которая открывает новые возможности микроскопических исследований не только физических, но и химических, и биологических объектов. В настоящее время методы нейтронной томографии реализованы с использованием коллимированных потоков нейтронов на ядерных реакторах или мощных ускорителях. Получены параксиальные пучки нейтронов с плотностью потока 10^8 – 10^9 с⁻¹см⁻² и степенью коллимации от 50 до 300 (отношение длины коллиматора к его ширине) [2–4].

Один из новых подходов нейтронной томографии связан с предложением использования «точечных» источников нейтронов, т.е. источников ограниченных размеров (на уровне десятков или сотен микрометров). При этом радиальный разлет нейтронов из «точки» может обеспечить высокое разрешение, сравнимое с разрешением при использовании коллимированных пучков нейтронов, полученных из ядерных реакторов [5–7]. В качестве таких «точечных» источников нейтронов, например, рассматриваются лазерно-плазменные, в которых нейтроны образуются в плотной плазме, возникающей на специализированных мишенях под действием сфокусированного излучения мощных фемтосекундных лазеров [5–7]. В этих экспериментах зафиксирован заметный нейтронный выход, а именно, до 10⁶ нейтронов на 1 Дж вложенной энергии из области с размером ~ 100 мкм. Однако средний по времени поток нейтронов даже при использовании современных лазеров с частотой следования импульсов 1 кГц и энергией в импульсе около 0,1 Дж составит только около 10⁸ с⁻¹, что существенно уступает реакторным источникам. Таким образом, разработка новых мощных «точечных» источников нейтронов для томографии представляется актуальной задачей.

В недавних работах [8, 9] обсуждалась возможность создания «точечного» источника нейтронов на основе остро сфокусированного сильноточного пучка ионов дейтерия с энергией

Голубев Сергей Владимирович, г.н.с.
Изотов Иван Владимирович, н.с.
Лапин Роман Львович, старший лаборант-исследователь.
Сидоров Александр Васильевич, с.н.с.
Скалыга Вадим Александрович, зав. лаб.
Разин Сергей Владимирович, с.н.с.
Шапошников Роман Анатольевич, стажер-исследователь.
Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН.
Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.
E-mail: shaposhnikov-roma@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29 октября 2018 г.

© Голубев С. В., Изотов И. В., Лапин Р. Л., Сидоров А. В., Скалыга В. А., Разин С. В., Шапошников Р. А., 2018

иона на уровне 100 кэВ, бомбардирующего дейтерий- или тритийсодержащую мишень. При этом на мишени в фокальной области пучка в результате D-D (или D-T) реакции синтеза образуются нейтроны, количество которых пропорционально току пучка, а размер излучающей области определяется диаметром пучка на мишени, который, в свою очередь, определяется качеством пучка, а именно, его эмиттансом. Результаты численного моделирования действительно показали возможность фокусировки пучка в пятно с характерным размером на уровне ~ 100 мкм [8, 9]. Это предложение базируется на разработках сильноточных квазигазодинамических источников ионов на основе разряда, поддерживаемого мощным электромагнитным излучением гиротронов миллиметрового диапазона длин волн в условиях электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) в открытых магнитных ловушках [10–16]. Уже в первых экспериментах [12] с использованием ЭЦР-разряда, поддерживаемого в магнитной ловушке излучением гиротрона с мощностью 100 кВт и частотой 37,5 ГГц, при сравнительно небольших напряжениях экстракции (45 кВ) получены пучки ионов водорода и дейтерия с яркостью до $100 \text{ A}/(\pi \text{ мм мрад})^2$ (ток пучка – 450 мА, плотность тока – 800 mA/cm^2 при среднеквадратичном нормализованном эмиттансе на уровне $0,07 \pi \text{ мм мрад}$ и долей атомарных ионов более 90 %). При бомбардировке дейтерийсодержащей мишени (тяжелый лед и TiD_2) таким пучком ионов дейтерия с энергией 45 кэВ зарегистрированы заметные потоки нейтронов – до 10^9 с^{-1} [17–19].

Целью данной работы является продолжение исследований [12] в расширенных условиях, а именно, проведение экспериментов по формиро-

ванию пучка ионов дейтерия, имеющих более высокую энергию (до 80 кэВ), с фокусировкой такого пучка магнитоэлектронной линзой и измерение интенсивности потока нейтронов с дейтерийсодержащей мишени, помещенной в фокус этого ионного пучка.

Экспериментальная установка SMIS 37

Экспериментальные исследования характеристик «точечного» источника нейтронов проводились на установке SMIS 37, подробно описанной в работах [10–19]. Её схема представлена на рис. 1.

В экспериментах использовалось излучение гиротрона (1) с частотой 37,5 ГГц, мощностью до 100 кВт и длительностью импульса до 1,5 мс. Микроволновое излучение, проходящее через СВЧ-окно (2), фокусировалось с помощью специальной электродинамической системы (3) в центр разрядной камеры (4) диаметром 40 мм и длиной 250 мм, помещённой в магнитную ловушку простой пробочной конфигурации. Магнитное поле ловушки создавалось двумя катушками (5), расположенными на расстоянии 15 см друг от друга. Длительность импульса тока в катушках составляла 11 мс, максимальная индукция магнитного поля в пробках достигала 4 Тл, пробочное отношение (B_{max}/B_{min}) – 5.

Рабочий газ (дейтерий) подавался в предварительно откачиваемую до 10^{-7} Торр разрядную камеру по оси ловушки через систему импульсного газонапуска, интегрированную в электродинамическую систему ввода микроволнового излучения. Рабочее давление дейтерия в разрядной камере в момент СВЧ-импульса составляло 10^{-4} Торр. Разряд зажегся в максимуме импульса магнитного поля.

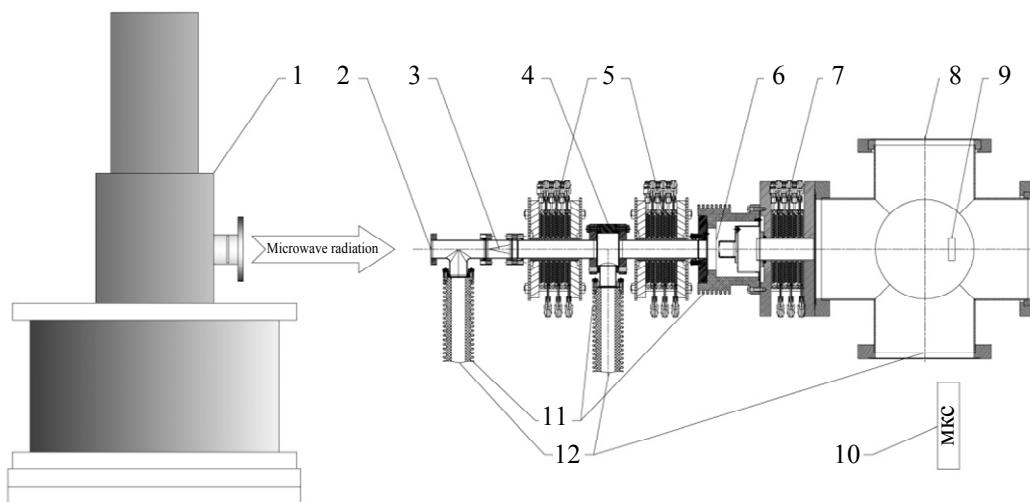


Рис. 1. Схема экспериментальной установки SMIS 37: 1 – гиротрон; 2 – входное СВЧ-окно; 3 – квазиоптическая система ввода СВЧ-излучения в плазму; 4 – разрядная вакуумная камера; 5 – импульсные магнитные катушки; 6 – система формирования ионного пучка; 7 – магнитоэлектронная фокусирующая линза; 8 – диагностическая камера; 9 – дейтерий содержащая мишень; 10 – детектор нейтронов; 11 – изоляторы высоковольтной развязки; 12 – вакуумные насосы.

Фокусировка ионного пучка

Формирование сходящегося пучка ионов дейтерия в экспериментах осуществлялось с помощью двухэлектродной системы экстракции (6) (диаметр отверстия в плазменном электроде – 10 мм, в пуллерном электроде – 15 мм, межэлектродный зазор 8 мм), на которую подавалось высоковольтное напряжение. Модернизация высоковольтной развязки (11) разрядной камеры позволила использовать для экстракции пучка напряжение до 100 кВ. Плазменный электрод системы экстракции располагался в 10 см за пробкой магнитной системы, где за счёт разлёта плазмы по силовым линиям магнитного поля плотность ее потока существенно уменьшалась, приближаясь к оптимальной для используемого напряжения экстракции. Магнито-статическая линза (7) (диаметр входного отверстия 40 мм, длина 10 см, максимальная индукция магнитного поля 2 Тл) устанавливалась на расстоянии 10 см за экстрактором. Она обеспечивала формирование слабосходящегося пучка ионов с углом схождения на уровне 10° . Фокальная плоскость пучка находилась на расстоянии 30 см от центра линзы.

Измерение тока экстрагируемого пучка ионов проводилось цилиндром Фарадея в фокальной области линзы (при работе с мишенью измерялся ток на нее). Измерения распределения пучка ионов по поперечным координатам в фокальной области линзы проводились по свечению сцинтиллятора из CsI диаметром 100 мм. Используемая магнитная линза с диаметром входного отверстия 40 мм перехватывала не весь экстрагируемый пучок из-за его расходимости после пуллера. В результате, в фокальной области линзы при оптимальных условиях эксперимента зарегистрирован ток 50 мА. Фотография свечения сцинтиллятора под действием сфокусированного пучка ионов дейтерия с током 50 мА и энергией 80 кэВ и распределение интенсивности пучка по поперечной координате представлены соответственно на рис. 2 и рис. 3.

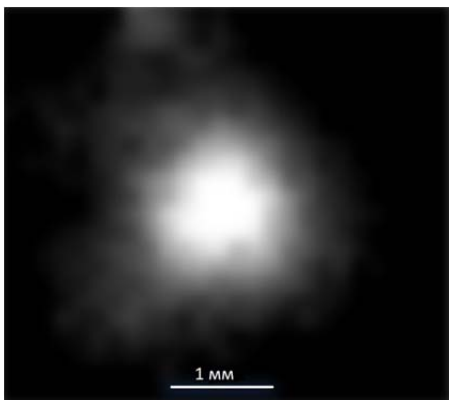


Рис. 2. Фотография свечения сцинтиллятора.

Поперечный размер пучка в фокальной плоскости длиннофокусной линзы составляет величину на уровне 1 мм, плотность тока достигает 5 А/см^2 .

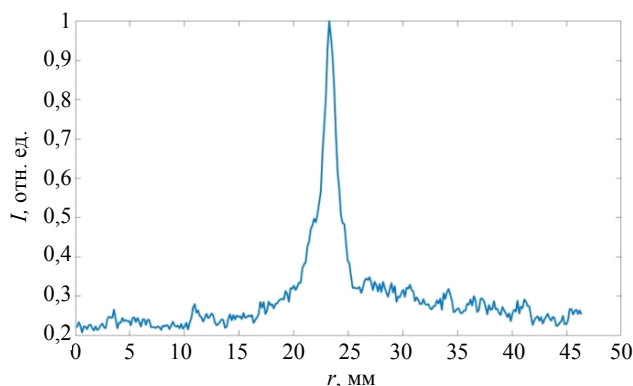


Рис. 3. Распределение нормированной интенсивности пучка I , пропорционального свечению, по поперечной координате r .

Генерация нейтронов

Для исследования эффективности генерации нейтронов в фокус пучка ионов дейтерия помещалась мишень из TiD_2 , при этом измерение интенсивности потока нейтронов проводилось с использованием калиброванного дозиметра-радиометра МКС-АТ1117М на основе пропорционального счетчика, расположенного внутри полиэтиленового замедлителя нейтронов. Дозиметр располагался на расстоянии 1,5 м от источника нейтронов на значительном удалении от стен помещения. Между детектором и источником нейтронов помещался экран из свинца толщиной 3 мм, экранирующий детектор от рентгеновского излучения. Эти измерения показали, что поток нейтронов растет с ростом тока и энергии пучка ионов. При ионном токе 50 мА и энергии иона 80 кэВ интенсивность нейтронного потока достигает величины 10^{10} нейтронов в секунду (полное число нейтронов за импульс $\sim 10^7$).

Заключение

Приведенные экспериментальные данные свидетельствуют о возможности использования сильнооточного пучка ионов дейтерия с малым эмиттансом, полученного из поддерживаемого миллиметровым излучением ЭЦР-источника с квазигазодинамическим удержанием плазмы, для создания квазиточечного компактного источника нейтронов с размером излучающей области на уровне 1 мм с выходом нейтронов до 10^{10} с^{-1} при использовании дейтериевой мишени. Такой «точечный» источник нейтронов представляется пер-

спективным для использования в нейтронной томографии.

Отметим, что использованная в экспериментах длиннофокусная фокусирующая система с небольшой апертурой не позволила полностью использовать полученный пучок ионов дейтерия и обеспечить предельно возможное сжатие высокоэнергетического пучка ионов. Согласно численному моделированию, дальнейшая оптимизация фокусирующей системы позволит полностью использовать ток пучка (до 500 мА), улучшить качество фокусировки (сжать пучок до 100 мкм) и получить нейтронный выход с дейтериевой мишени на уровне 10^{11} с^{-1} и свыше 10^{13} с^{-1} при использовании тритиевой мишени.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ
№ 16-19-10501.

ЛИТЕРАТУРА

1. Anderson I. S., McGreevy R. L., Bilheux H. Z. Neutron Imaging and Applications. – New York: Springer, 2009.
2. Aksenov V. L. // Physics-Uspekhi. 1997. Vol. 40. No. 5. P. 520.
3. Ditmire T., Zweiback J., Yanovsky V. P., Cowan T. E., Hays G., Wharton K. B. // Physics of Plasmas. 2000. Vol. 7. P. 1993.
4. Davis J., Petrov G. M., Velikovich A. L. // Physics of Plasmas. 2006. Vol. 13. No. 6. P. 064501.
5. Higginson D. P., Vassura L., Gugiu M. M., Antici P., Borghesi M., Brauckmann S., Diouf C. // Physical Review Letters. 2015. Vol. 115. No. 5. P. 054802.
6. Roth M., Jung D., Falk K., Guler N., Deppert O., Devlin M., Favalli A., Fernandez J., Gautier D., Geissel M., Haight R., Hamilton C. E., Hegelich B. M., Johnson R. P., Merrill F., Schaumann G., Schoenberg K., Schollmeier M., Shimada T., Taddeucci T., Tybo J. L., Wagner F., Wender S. A., Wilde C. H., and Wurden G. A. // Physical Review Letters. 2013. Vol. 110. No. 4. P. 044802.
7. Pomerantz I., McCary E., Meadows A. R., Arefiev A., Bernstein A. C., Chester C., Cortez J., Donovan M. E., Dyer G., Gaul E. W., Hamilton D., Kuk D., Lestrade A. C., Wang C., Ditmire T., and Hegelich B. M. // Physical Review Letters. 2014. Vol. 113. No. 18. P. 184801.
8. Golubev S., Skalyga V., Izotov I., Sidorov A. // Journal of Instrumentation. 2017. Vol. 12. No. 2. P. T02003.
9. Golubev S. V., Izotov I. V., Razin S. V., Skalyga V. A. // Radiophysics and Quantum Electronics. 2017. Vol. 60. P. 779.
10. Golubev S. V., Razin S. V., Sidorov A. V., Skalyga V. A., Vodopyanov A. V., Zorin V. G. // Review of Scientific Instruments. 2004. Vol. 75. No. 5. P. 1675.
11. Skalyga V., Zorin V., Izotov I., Razin S., Sidorov A., Bohanov A. // Plasma Sources Science and Technology. 2006. Vol. 15. P. 727.
12. Skalyga V., Izotov I., Golubev S., Sidorov A., Razin S., Vodopyanov A., Tarvainen O., Koivisto H., Kalvas T. // Review of Scientific Instruments. 2016. Vol. 87. P. 02A716.
13. Skalyga V., Izotov I., Sidorov A., Razin S., Zorin V., Tarvainen O., Koivisto H., Kalvas T. // JINST. 2012. Vol. 7. P. P10010.
14. Skalyga V., Izotov I., Razin S., Sidorov A., Golubev S., Kalvas T., Koivisto H., Tarvainen O. // Review of Scientific Instruments. 2014. Vol. 85. No. 2. P. 02A702-1.
15. Golubev S. V., Razin S. V., Semenov V. E., Smirnov A. N., Vodopyanov A. V., Zorin V. G. // Rev. Sci. Instrum. 2000. Vol. 71. P. 669.
16. Skalyga V., Zorin V., Izotov V., Sidorov A., Lamy T., Sortais P., Thuillier T. // Review of Scientific Instruments. 2006. Vol. 77. No. 3. P. 03A325-1.
17. Skalyga V., Izotov I., Golubev S., Sidorov A., Razin S., Strelkov A., Tarvainen O., Koivisto H., Kalvas T. // Journal of Applied Physics. 2015. Vol. 118. P. 093301.
18. Skalyga V., Izotov I., Golubev S., Razin S., Sidorov A., Maslennikova A., Volovecky A., Kalvas T., Koivisto H., Tarvainen O. // Applied Radiation and Isotopes. 2015. Vol. 106. P. 29.
19. Skalyga V., Izotov I., Golubev S., Razin S., Sidorov A., Maslennikova A., Volovecky A., Kalvas T., Koivisto H., Tarvainen O. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2014. Vol. A 768. P. 146.

PACS: 52.50.Dg, 28.20.Pr, 29.25.Dz.

Pulsed neutron generator with a point-like emission area based on a high-current ECR source of deuterium ions

S. V. Golubev, I. V. Izotov, R. L. Lapin, A. V. Sidorov, V. A. Skalyga, S. V. Razin,
and R. A. Shaposhnikov

Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS)
46 Ulyanova str., Nizhny Novgorod, 603950, Russia
E-mail: shaposhnikov-roma@mail.ru

Received October 29, 2018

The paper demonstrates a possibility of a high-power compact neutron generator creation with the 10^{10} s^{-1} neutron yield and small emitting area (about 1 mm) based on a high-current ECR ion source

with a quasigasdynamical plasma confinement regime. Neutron generation is realized by the D-D fusion at deuterium-loaded target bombarded by a sharp focused high-current (50 mA) deuterium ion beam with energy at the level of 80 keV.

Keywords: neutron generator, point-like neutron source, high-current ion beams, ECR discharge, gyrotron.

REFERENCES

1. I. S. Anderson, R. L. McGreevy, and H. Z. Bilheux, *Neutron Imaging and Applications* (Springer, New York, 2009).
2. V. L. Aksenov, *Physics-Uspekhi* **40** (5), 520 (1997).
3. T. Ditmire, J. Zweiback, V. P. Yanovsky, T. E. Cowan, G. Hays, and K. B. Wharton, *Physics of Plasmas* **7**, 1993 (2000).
4. J. Davis, G. M. Petrov, and A. L. Velikovich, *Physics of Plasmas* **13** (6), 064501 (2006).
5. D. P. Higginson, L. Vassura, M. M. Gugu, P. Antici, M. Borghesi, S. Brauckmann, and C. Diouf, *Physical Review Letters* **115** (5), 054802 (2015).
6. M. Roth, D. Jung, K. Falk, N. Guler, O. Deppert, M. Devlin, A. Favalli, J. Fernandez, D. Gautier, M. Geissel, R. Haight, C. E. Hamilton, B. M. Hegelich, R. P. Johnson, F. Merrill, G. Schaumann, K. Schoenberg, M. Schollmeier, T. Shimada, T. Taddeucci, J. L. Tybo, F. Wagner, S. A. Wender, C. H. Wilde, and G. A. Wurden, *Physical Review Letters* **110** (4), 044802 (2013).
7. I. Pomerantz, E. McCary, A. R. Meadows, A. Arefiev, A. C. Bernstein, C. Chester, J. Cortez, M. E. Donovan, G. Dyer, E. W. Gaul, D. Hamilton, D. Kuk, A. C. Lestrade, C. Wang, T. Ditmire, and B. M. Hegelich, *Physical Review Letters* **113** (18), 184801 (2014).
8. S. Golubev, V. Skalyga, I. Izotov, and A. Sidorov, *Journal of Instrumentation* **12** (2), T02003 (2017).
9. S. V. Golubev, I. V. Izotov, S. V. Razin, and V. A. Skalyga, *Radiophysics and Quantum Electronics* **60**, 779 (2017).
10. S. V. Golubev, S. V. Razin, A. V. Sidorov, V. A. Skalyga, A. V. Vodopyanov, and V. G. Zorin, *Review of Scientific Instruments* **75** (5), 1675 (2004).
11. V. Skalyga, V. Zorin, I. Izotov, S. Razin, A. Sidorov, and A. Bohanov, *Plasma Sources Science and Technology* **15**, 727 (2006).
12. V. Skalyga, I. Izotov, S. Golubev, A. Sidorov, S. Razin, A. Vodopyanov, O. Tarvainen, H. Koivisto, and T. Kalvas, *Review of Scientific Instruments* **87**, 02A716 (2016).
13. V. Skalyga, I. Izotov, A. Sidorov, S. Razin, V. Zorin, O. Tarvainen, H. Koivisto, and T. Kalvas, *JINST* **7**, P10010 (2012).
14. V. Skalyga, I. Izotov, S. Razin, A. Sidorov, S. Golubev, T. Kalvas, H. Koivisto, and O. Tarvainen, *Review of Scientific Instruments* **85** (2), 02A702-1 (2014).
15. S. V. Golubev, S. V. Razin, V. E. Semenov, A. N. Smirnov, A. V. Vodopyanov, and V. G. Zorin, *Rev. Sci. Instrum.* **71**, 669 (2000).
16. V. Skalyga, V. Zorin, V. Izotov, A. Sidorov, T. Lamy, P. Sortais, and T. Thuillier, *Review of Scientific Instruments* **77** (3), 03A325-1 (2006).
17. V. Skalyga, I. Izotov, S. Golubev, A. Sidorov, S. Razin, A. Strelkov, O. Tarvainen, H. Koivisto, and T. Kalvas, *Journal of Applied Physics* **118**, 093301 (2015).
18. V. Skalyga, I. Izotov, S. Golubev, S. Razin, A. Sidorov, A. Maslennikova, A. Volovecky, T. Kalvas, H. Koivisto, and O. Tarvainen, *Applied Radiation and Isotopes* **106**, 29 (2015).
19. V. Skalyga, I. Izotov, S. Golubev, S. Razin, A. Sidorov, A. Maslennikova, A. Volovecky, T. Kalvas, H. Koivisto, and O. Tarvainen, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **768**, 146 (2014).