

## Сильноточные импульсные ЭЦР-источники ионов

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

*В настоящее время в ряде ионных электронно-циклотронных резонансных (ЭЦР) источников для создания и нагрева плазмы используется мощное микроволновое излучение современных гиротронов. Вследствие большой мощности излучения такие системы работают в основном в импульсном режиме. Этот тип ионных ЭЦР-источников был разработан в Институте прикладной физики Российской академии наук, и большая часть экспериментальных исследований была выполнена на установке SMIS 37. Для создания плазмы на SMIS 37 использовались гиротроны с частотами 37,5 и 75 ГГц и максимальными мощностями 100 и 200 кВт, соответственно. Такое микроволновое излучение позволяло создавать плазму с уникальными параметрами: электронной плотностью более  $10^{13}$  см<sup>-3</sup>, электронной температурой 50–300 эВ, ионной температурой около 1 эВ. Принципиальное отличие этих систем от традиционных ЭЦР-источников состоит в реализации так называемого квазигазодинамического режима удержания плазмы в ловушке. В соответствии с режимом удержания такие источники были названы «газодинамическими ЭЦР-источниками». В этих системах время жизни плазмы обычно составляет несколько десятков микросекунд, что в сочетании с высокой электронной концентрацией приводит к формированию плазменных потоков из ловушки с плотностями до 1–10 А/см<sup>2</sup>. Была продемонстрирована возможность создания пучков МЗИ (азот, аргон) и протонных (дейтронных) пучков с токами на уровне сотен мА при среднеквадратичном нормализованном эмиттансе порядка 0,1 пк·мм·мрад. Следующим шагом в исследованиях является переход к непрерывному режиму работы газодинамического ионного ЭЦР-источника (ЭЦР ИИ). С этой целью в ИПФ РАН создаётся новая экспериментальная установка. Для получения плазмы в будущем источнике будет использоваться излучение гиротронов на частотах 28 и 37,5 ГГц. В настоящей работе дан обзор полученных результатов и состояния дел по монтажу нового источника.*

*Ключевые слова:* ионный источник, сильноточные ионные пучки, ЭЦР-разряд, гиротрон.

**Ссылка:** Скалыга В. А., Голубев С. В., Изотов И. В., Лапин Р. Л., Разин С. В., Сидоров А. В., Шапошников Р. А. // Прикладная физика. 2019. № 1. С. 17.

**Reference:** V. A. Skalyga, S. V. Golubev, I. V. Izotov, R. L. Lapin, S. V. Razin, A. V. Sidorov, and R. A. Shaposhnikov, Prikl. Fiz., No. 1, 17 (2019).

Скалыга Вадим Александрович, зав. лаб., д.ф.-м.н.  
Голубев Сергей Владимирович, г.н.с., д.ф.-м.н., профессор.  
Изотов Иван Владимирович, м.н.с., к.ф.-м.н.  
Лапин Роман Львович, ст. лаборант-исследователь.  
Разин Сергей Владимирович, с.н.с., к.ф.-м.н.  
Сидоров Александр Васильевич, с.н.с., к.ф.-м.н.  
Шапошников Роман Анатольевич, стажер-исследователь.  
Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук.  
Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.  
E-mail: skalyga.vadim@gmail.com

Статья поступила в редакцию 19 октября 2018 г.

© Скалыга В. А., Голубев С. В., Изотов И. В., Лапин Р. Л., Разин С. В., Сидоров А. В., Шапошников Р. А., 2019

Федеральной целевой программы  
«Исследования и разработки по приоритетным  
направлениям развития научно-  
исследовательского комплекса России  
на 2014–2020 годы)», Соглашение  
№ 14.604.21.0195 (уникальный идентификацион-  
ный номер RFMEFI60417X0195).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Golubev S. V., Razin S. V., Sidorov A. V., Skalyga V. A., Vodopyanov A. V., Zorin V. G. // Rev. Sci. Instrum. 2004. Vol. 75. No. 5. P. 1675.
2. Golubev S. V., Izotov I. V., Razin S. V., Skalyga V. A., Vodopyanov A. V., Zorin V. G. // Trans. Fusion Sci. Technol. 2005. Vol. 47. No. 1T. P. 345.
3. Sidorov A., Izotov I., Razin S., Skalyga V., Zorin V., Balabaev A., Kondrashev S., Bokhanov A. // Rev. Sci. Instrum.

Работа выполняется в рамках реализации

2006. Vol. 77. No. 3. P. 03A341-1.
4. Skalyga V., Zorin V., Izotov I., Razin S., Sidorov A., Bohanov A. // Plasma Sources Sci. Tech. 2006. Vol. 15. P. 727.
  5. Golubev S., Izotov I., Razin S., Sidorov A., Skalyga V., Vodopyanov A., Zorin V., Bokhanov A. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2007. Vol. 256. P. 537.
  6. Marie-Jeanne M., Balint P., Fourel Ch., Giraud J., Jacob J., Lamy Th., Latrasse L., Sortais P., Thuillier Th., Daversin C., Debray F., Trophime Ch., Veys S., Izotov I., Skalyga V., Zorin V. / Proc. of the 20<sup>th</sup> International Workshop on Electron Cyclotron Resonance Ion Sources ECRIS2012 (Sydney, Australia 2012). P. 111.
  7. Lamy T., Jacob J., Angot J., Sole P., Thuillier T., Bakulin M., Ereemeev A. G., Izotov I., Movshevich B., Skalyga V., Debray F., Dumas J., Grandclement C., Sala P., Trophime C. / Proc. of the 13th International Conference on Heavy Ion Accelerator Technology (Yokohama, Japan 2015). P. THM2101.
  8. Geller R. Electron cyclotron resonance ion sources and ECR plasma (Institute of Physics, Bristol, 1996).
  9. Dorf M. A., Zorin V. G., Sidorov A. V., Bokhanov A. F., Izotov I. V., Razin S. V., Skalyga V. A. // Nuclear Instrum. and Meth. in Phys. Research (section A). 2014. Vol. 733. P. 107.
  10. Golubev S. V., Razin S. V., Semenov V. E., Smirnov A. N., Vodopyanov A. V., Zorin V. G. // Rev. Sci. Instrum. 2004. Vol. 71. P. 669.
  11. Vodopyanov A. V., S Golubev. V., Khizhnyak V. I., Mansfeld D. A., Nikolaev A. G., Oks E. M., Yushkov G. Yu. // High Energy Phys. and Nucl. Phys. 2007. Vol. 31. No. S1. P. 152.
  12. Пастухов В. Вопросы теории плазмы. – М: Энергоиздат, 1984.
  13. Mirnov V. V., Ryutov D. D. // Pisma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki. 1979. Vol. 5. P. 678.
  14. Zorin V. G., Skalyga V. A., Izotov I. V., Razin S. V., Sidorov A. V., Lamy T., Thuillier T. // Trans. Fusion Sci. Technol. 2011. Vol. 59. P. 140.
  15. Thuillier T., Lamy T., Latrasse L., Izotov I. V., Sidorov A. V., Skalyga V. A., Zorin V. G., Marie-Jeanne M. // Rev. Sci. Instrum. 2008. Vol. 79. P. 02A314.
  16. Izotov I. V., Sidorov A. V., Skalyga V. A., Zorin V. G., Lamy T., Latrasse L., Thuillier T. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. Vol. 36. P. 1494.
  17. Skalyga V., Izotov I., Zorin V., Sidorov A. // Physics of Plasmas. 2012. Vol. 19. P. 023509.
  18. Skalyga V., Izotov I., Razin S., Sidorov A., Zorin V. / Proceedings of the 8-th International Workshop «Strong microwaves and terahertz waves: sources and applications» (Nizhny Novgorod – St. Petersburg, Russia, July 9–16, 2011). P. 200.
  19. Maunoury L., Adoui L., Grandin J. P., Noury F., Huber B. A., Lamour E., Prigent C., Rozet J. P., Vernhet D., Leherissier P., Pacquet J. Y. // Rev. Sci. Instrum. 2008. Vol. 79. P. 02A313.
  20. Izotov I. V., Skalyga V. A., Zorin V. G. // Rev. Sci. Instrum. 2012. Vol. 83. P. 02A342.
  21. beta-beam.web.cern.ch
  22. Gammino S., Celona L., Ciavola G., Mascali D., Miracoli R., Maimone F. / Proc. of LINAC2010, (Tsukuba, Japan, 2010), THP116.
  23. Lindroos M., Bousson S., Calaga R., Danared H., Devanz G., Duperrier R., Eguia J., Eshraqi M., Gamino S., Hahn H., Jansson A., Oyon C., Pape-Moller S., Peggs S., Ponton A., Rathsmann K., Ruber R., Satogata T., Trahern G. // Nucl. Instrum. Methods B. 2011. Vol. 269. P. 3258.
  24. Gobin R., Adroit G., Bogard D., Bourdelle G., Chauvin N., Delferriere O., Gauthier Y., Girardot P., Guiho P., Harraut F., Jannin J. L., Loiseau D., Mattei P., Roger A., Sauce Y., Senec F., Vacher T. // Rev. Sci. Instrum. 2012. Vol. 83. P. 02A345.
  25. Skalyga V., Izotov I., Razin S., Sidorov A., Golubev S., Kalvas T., Koivisto H., Tarvainen O. // Rev. Sci. Instrum. 2014. Vol. 85. No. 2. P. 02A702.
  26. Skalyga V., Izotov I., Sidorov A., Razin S., Zorin V., Tarvainen O., Koivisto H., Kalvas T. // JINST. 2012. Vol. 7. P. P10010.
  27. Skalyga V., Izotov I., Golubev S., Vodopyanov A., Tarvainen O. // Rev. Sci. Instrum. 2016. Vol. 87. No. 2. P. 02A715.
  28. www.gycom.ru

PACS: 52.50.Dg

## High-current pulsed ECR ion sources

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

Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS), a Federal Research Center  
46 Ulyanova str., 603950, Nizhny Novgorod, Russia  
E-mail: Skalyga.vadim@gmail.com

Received October 19, 2018

***In present time, some ECR ion sources use a high frequency powerful microwave radiation of modern gyrotrons for plasma heating. Due to high radiation power such systems mainly operate in a pulsed mode. This type of ECR ion sources was developed at the Institute of Applied Physics of Russian Academy of Sciences and the most part of experimental research was performed at SMIS 37 facility. At SMIS 37 gyrotrons with 37.5 and 75 GHz frequencies and 100 and 200 kW maximum power respectively are used for plasma production. Such heating microwaves allow creating plasma with unique parameters: electron density  $> 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , electron temperature 50–300 eV, ion temperature about 1 eV. The principal difference between these systems from the conventional ECR sources is a so-called quasi-gasdynamic regime of plasma confinement. In accordance with the confinement regime such sources have been called "gas-dynamic ECR sources". Typically, plasma lifetime in such systems is about 10 microseconds, which in combination with the high plasma density leads to formation of the plasma fluxes from a trap with density up to  $1\text{--}10 \text{ A/cm}^2$ . The possibility of multiply charged ion beams (nitrogen, argon) and proton (or deuterium) beams production with currents up a few hundreds of mA and normalized rms emittance about  $0.1 \pi\text{-mm-mrad}$  was demonstrated. The next step in the research is a transition to continuous wave (CW) operation. For this purpose, a new experimental facility is under construction at the IAP RAS. Future source will utilize 28 and 37.5 GHz gyrotron radiation for plasma heating. Overview of the obtained results and the status of the new source development will be presented.***

**Keywords:** ion source, high-current ion beams, ECR discharge, gyrotron.

## REFERENCES

1. 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).
2. S. V. Golubev, I. V. Izotov, S. V. Razin, V. A. Skalyga, A. V. Vodopyanov, and V. G. Zorin, Transactions of Fusion Science and Technology **47** (1T), 345 (2005).
3. A. Sidorov, I. Izotov, S. Razin, V. Skalyga, V. Zorin, A. Balabaev, S. Kondrashev, and A. Bokhanov, Review of Scientific Instruments **77** (3), 03A341-1 (2006).
4. V. Skalyga, V. Zorin, I. Izotov, S. Razin, A. Sidorov, and A. Bohanov, Plasma Sources Science and Technology **15**, 727 (2006).
5. S. Golubev, I. Izotov, S. Razin, A. Sidorov, V. Skalyga, A. Vodopyanov, V. Zorin, and A. Bokhanov, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B **256**, 537 (2007).
6. M. Marie-Jeanne, P. Balint, Ch. Fourel, J. Giraud, J. Jacob, Th. Lamy, L. Latrasse, P. Sortais, Th. Thuillier, C. Daversin, F. Debray, Ch. Trophime, S. Veys, I. Izotov, V. Skalyga, and V. Zorin, in *Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Workshop on Electron Cyclotron Resonance Ion Sources ECRIS2012* (Sydney, Australia 2012), pp. 111–113.
7. T. Lamy, J. Jacob, J. Angot, P. Sole, T. Thuillier, M. Bakulin, A. G. Ereemeev, I. Izotov, B. Movshevich, V. Skalyga, F. Debray, J. Dumas, C. Grandclement, P. Sala, and C. Trophime, in *Proceedings of the 13th International Conference on Heavy Ion Accelerator Technology*, p. THM2I01 (2015).
8. R. Geller, *Electron cyclotron resonance ion sources and ECR plasma* (Institute of Physics, Bristol, 1996).
9. M. A. Dorf, V. G. Zorin, A. V. Sidorov, A. F. Bokhanov, I. V. Izotov, S. V. Razin, and V. A. Skalyga, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research (section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment) **733**, 107, (2014).
10. 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).
11. A. V. Vodopyanov, S. V. Golubev, V. I. Khizhnyak, D. A. Mansfeld, A. G. Nikolaev, E. M. Oks, and G. Yu. Yushkov, 2007 High Energy Phys. and Nucl. Phys. **31** (S1), 152 (2007).
12. V. Pastukhov, *Questions of Plasma Theory* (Energoatomizdat, Moscow, 1984) [in Russian].
13. V. V. Mirnov and D. D. Ryutov, Pisma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki **5**, 678 (1979).
14. V. G. Zorin, V. A. Skalyga, I. V. Izotov, S. V. Razin, A. V. Sidorov, T. Lamy, and T. Thuillier, Trans. Fusion Sci. Technol. **59**, 140 (2011).
15. T. Thuillier, T. Lamy, L. Latrasse, I. V. Izotov, A. V. Sidorov, V. A. Skalyga, V. G. Zorin, and M. Marie-Jeanne, Rev. Sci. Instrum. **79**, 02A314 (2008).
16. I. V. Izotov, A. V. Sidorov, V. A. Skalyga, V. G. Zorin, T. Lamy, L. Latrasse, and T. Thuillier, IEEE Trans. Plasma Sci. **36**, 1494 (2008).
17. V. Skalyga, I. Izotov, V. Zorin, and A. Sidorov Physics of Plasmas **19**, 023509 (2012).
18. V. Skalyga, I. Izotov, S. Razin, A. Sidorov, and V. Zorin in *Proceedings of the 8-th International workshop «Strong microwaves and terahertz waves: sources and applications»* (Nizhny Novgorod – St. Petersburg, Russia, July 9–16, 2011), pp. 200–201.
19. L. Maunoury, L. Adoui, J. P. Grandin, F. Noury, B. A. Huber, E. Lamour, C. Prigent, J. P. Rozet, D. Vernhet, P. Leherissier, and J. Y. Pacquet, Rev. Sci. Instrum. **79**, 02A313 (2008).
20. I. V. Izotov, V. A. Skalyga, and V. G. Zorin, Rev. Sci. Instrum. **83**, 02A342 (2012).
21. beta-beam.web.cern.ch

22. S. Gammino, L. Celona, G. Ciavola, D. Mascali, R. Miracoli, and F. Maimone, in *Proceedings of LINAC2010*, (Tsukuba, Japan, 2010), THP116.
23. M. Lindroos, S. Bousson, R. Calaga, H. Danared, G. Devanz, R. Duperrier, J. Eguia, M. Eshraqi, S. Gamino, H. Hahn, A. Jansson, C. Oyon, S. Pape-Moller, S. Peggs, A. Ponton, K. Rathsman, R. Ruber, T. Satogata, and G. Trahern Nucl. Instrum. Methods B **269**, 3258 (2011).
24. R. Gobin, G. Adroit, D. Bogard, G. Bourdelle, N. Chauvin, O. Delferriere, Y. Gauthier, P. Girardot, P. Guiho, F. Harrault, J. L. Jannin, D. Loiseau, P. Mattei, A. Roger, Y. Sauce, F. Senee, and T. Vacher, Rev. Sci. Instrum. **83**, 02A345 (2012).
25. V. Skalyga, I. Izotov, S. Razin, A. Sidorov, S. Golubev, T. Kalvas, H. Koivisto, and O. Tarvainen, Review of Scientific Instruments **85** (2), 02A702 (2014).
26. V. Skalyga, I. Izotov, A. Sidorov, S. Razin, V. Zorin, O. Tarvainen, H. Koivisto, and T. Kalvas, JINST **7**, P10010 (2012).
27. V. Skalyga, I. Izotov, S. Golubev, A. Vodopyanov, and O. Tarvainen, Review of Scientific Instruments **87** (2), 02A715 (2016).
28. [www.gycom.ru](http://www.gycom.ru)