

**Экспериментальное исследование динамики плазмы микропинча
с использованием формирующей линии***А. Н. Долгов, Н. А. Клячин, Д. Е. Прохорович*

Ранее было установлено, что существует взаимосвязь между динамикой плазмы и процессом ускорения электронов в микропинчевом разряде. Авторы предприняли попытку ввести управляемую временную задержку процесса ускорения электронов относительно процесса сжатия плазмы в перетяжке канала тока. С указанной целью для сильноточной вакуумной искры в режиме микропинчевания был использован комбинированный источник тока, состоящий из параллельно включенных конденсаторной батареи и формирующей линии переменной длины. Было обнаружено, что при использовании формирующей линии достаточной протяженности наблюдается поток высокоэнергетичных электронов с энергией порядка 10^4 – 10^5 эВ на частоту, распространяющийся в направлении внешнего электрода независимо от полярности электродов, а продолжительность существования условий для ускорения электронов примерно на два порядка величины превышает продолжительность быстрого радиационного сжатия и процесс ускорения не может быть связан исключительно с ним.

Ключевые слова: микропинчевый разряд, зависимость геометрии источников, мягкое рентгеновское излучение, плазма.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-3-264-276

Долгов Александр Николаевич¹, в.н.с.

E-mail: alnikdolgov@mail.ru

Клячин Николай Альбертович², доцент.

E-mail: naklyachin@mephi.ru

Прохорович Дмитрий Евгеньевич¹, с.н.с.¹ ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова».

Россия, 127055, Москва, ул. Сущевская, 22.

² НИЯУ МИФИ.

Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31.

Статья поступила в редакцию 10 декабря 2021 г.

© Долгов А. Н., Клячин Н. А., Прохорович Д. Е., 2022

ЛИТЕРАТУРА

1. Cohen L., Feldman U., Swartze M., Underwood J. H. // J. Opt. Soc. Am. 1968. Vol. 58. № 6. P. 843.
2. Schwob J. L., Frankel B. S. // Phys. Letters. 1972. Vol. 40A. № 1. P. 81.
3. Гольц Э. Я., Житник И. А., Кононов Э. Я., Мандельштам С. Л., Сидельников Ю. В. // ДАН СССР. 1975. Т. 200. № 3. С. 560.

4. Корон Е. Д., Мейерович Б. Э., Сидельников Ю. В., Сухоруков С. Т. // УФН. 1979. Т. 129. № 6. С. 87.

5. Веретенников В. А., Полухин С. Н., Семенов О. Г., Сидельников Ю. В. // Физика плазмы. 1981. Т. 7. № 6. С. 1199.

6. Анциферов П. С., Кошелев К. Н., Крауз В. И. и др. // Физика плазмы. 1990. Т. 16. № 11. С. 1319.

7. Долгов А. Н. Эмиссия частиц и излучения в микропинчевом разряде... Дис. докт. физ.-мат. наук. – М.: Московский инженерно-физический ин-т (гос. ун-т), 2005.

8. Пикуз С. А. X-пинч. Экспериментальные исследования... Дис. докт. физ.-мат. наук. – М.: Физический ин-т им. П. Н. Лебедева РАН, 2007.

9. Баронова Е. О. Развитие методов рентгеновской спектроскопии и их применение в исследованиях плазмы сильноточных разрядов... Дис. докт. физ.-мат. наук. – М.: РНЦ «Курчатовский институт», Институт ядерного синтеза. 2009.

10. Вихрев В. В., Иванов В. В., Кошелев К. Н. // Физика плазмы. 1982. Т. 8. № 6. С. 1211.

11. Блинные С. И., Имшенник В. С. // Физика плазмы. 1982. Т. 8. № 1. С. 193.

12. Веретенников В. А., Исаков А. И., Крохин О. Н., Семенов О. Г., Сидельников Ю. В. // Препринт ФИАН СССР. 1983. № 59. – 20 с.

13. Bailey J., Fisher A., Rostoker N. // J. Appl. Phys. 1986. Vol. 60. № 6. P. 1939.
14. Орешкин В. И. // Изв. вузов Физ. 1997. Т. 40. № 12. С. 76.
15. Bernal L., Bruzzone H. // Plasma Phys. and Contr. Fusion. 2002. Vol. 44. № 2. P. 223.
16. Долгов А. Н., Прохорович Д. Е. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2015. Т. 16. Вып. 2. С. 2.
17. Аверкиев В. В., Долгов А. Н., Ляпидевский В. К., Савелов А. С., Салахутдинов Г. Х. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. № 6. С. 724.
18. Миронов Б. Н. // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 6. С. 546.
19. Миронов Б. Н. // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 10. С. 886.
20. Nishio M., Sakuma H., Takasugi K. // Plasma and Fusion Research: Rapid Communications. 2011. Vol. 6. P. 1201009. DOI: 10.1585/pfr.6.1201009.
21. Ананьев С. С., Данько С. А., Мялтон В. В., Калинин Ю. Г., Крауз В. И., Виноградов В. П., Виноградова Ю. В. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2013. Т. 36. Вып. 4. С. 102.
22. Горбунов А. А., Гулин М. А., Долгов А. Н., Николаев О. В., Савелов А. С. // Письма в ЖЭТФ. 1989. Т. 50. Вып. 7. С. 320.
23. Гулин М. А., Долгов А. Н., Кириченко Н. Н., Савелов А. С. // ЖЭТФ. 1995. Т. 108. № 10. С. 1309.
24. Mei Wu, Li Chen, Ti-Pei Li. // Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics. 2005. Vol. 5. № 1. P. 57.
25. Долгов А. Н., Клячин Н. А., Прохорович Д. Е. // Физика плазмы. 2019. Т. 45. № 7. С. 621.
26. Долгов А. Н., Земченкова Н. В., Клячин Н. А., Прохорович Д. Е. // Прикладная физика. 2012. № 1. С. 68.
27. Кремнев В. В., Месяц Г. А. Методы умножения и трансформации импульсов в сильноточной электронике. – Новосибирск, 1987.
28. Диагностика плазмы / Под ред. Р. Хаддлстоуна и С. Леонарда. Пер. с англ. / Под ред. С. Ю. Лукьянова. – М.: Изд-во «МИР», 1967.
29. Долгов А. Н., Клячин Н. А., Прохорович Д. Е. // Прикладная физика. 2018. № 5. С. 26.
30. Блохин М. А., Швейцер И. Г. Рентгеноспектральный справочник. – М.: «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1982.
31. Долгов А. Н., Кириченко Н. Н., Ляпидевский В. К., Савелов А. С., Салахутдинов Г. Х. // Физика плазмы. 1993. Т. 19. № 1. С. 97.
32. Гулин М. А., Долгов А. Н., Николаев О. В., Савелов А. С. // Физика плазмы. 1990. Т. 16. № 8. С. 1015.
33. Веретенников В. А., Долгов А. Н., Крохин О. Н., Семёнов О. Г. // Физика плазмы. 1985. Т. 11. № 8. С. 1107.
34. Lee T. N. // Annals of New York Academy of Science. 1975. Vol. 251. P. 112.
35. Афонин В. И. // Физика плазмы. 1995. Т. 21. № 7. С. 648.
36. Долгов А. Н. // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 6. С. 539.
37. Долгов А. Н., Вихрев В. В. // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 3. С. 290.
38. Долгов А. Н., Клячин Н. А., Прохорович Д. Е. // Физика плазмы. 2016. Т. 42. № 12. С. 1057.
39. Долгов А. Н., Земченкова Н. В., Клячин Н. А., Прохорович Д. Е. // Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 8. С. 826.
40. Долгов А. Н., Клячин Н. А., Прохорович Д. Е. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. Вып. 3. С. 7.
41. Козлов Н. П. Основы физики плазмы. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1997.
42. Франк-Каменецкий Д. А. Лекции по физике плазмы. – М.: Атомиздат, 1968.
43. Спитцер Л. Физика полностью ионизированного газа. – М.: Мир, 1965.
44. Гулин М. А., Долгов А. Н., Кириченко Н. Н., Ляпидевский В. К., Масленникова Н. В., Савелов А. С. // ПТЭ. 1996. № 6. С. 82.
45. Долгов А. Н., Земченкова Н. В., Клячин Н. А., Прохорович Д. Е. // Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 3. С. 194.
46. Vikhrev V. V., Ivanov V. V., Rozanova G. A. // Nucl. Fusion. 1993. Vol. 33. № 2. P. 311.

PACS: 52.58.Lq

Experimental study of micropinch plasma dynamics using a forming line

A. N. Dolgov¹, N. A. Klyachin², and D. E. Prokhorovich¹

¹ Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA)
22 Sushevskaya st., Moscow, 127055, Russia
E-mail: alnikdolgov@mail.ru

² National Research Nuclear University MEPHI
31 Kashirskoe sh., Moscow, 115409, Russia

Received December 10, 2021

To study the relationship between the plasma dynamics and the electron acceleration process in a micro-pin discharge, a combined current source consisting of a capacitor bank

connected in parallel and a variable-length forming line was used. It is possible to change the direction of the flow of "hot" electrons without changing the polarity of the electrodes.

Keywords: micropinch discharge, dependence of the geometry of the sources, soft X-ray radiation, plasma.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-3-264-276

REFERENCES

1. L. Cohen, U. Feldman, M. Schwarze, and J. H. Underwood, *J. Opt. Soc. Am.* **58** (6), 843 (1968).
2. J. L. Schwob and B. S. Frankel, *Physics Letters* **40A** (1), 81 (1972).
3. E. Ya. Golts, I. A. Zhitnik, E. Ya. Kononov, S. L. Mandelstam, and Yu. V. Sidelnikov, *DAN USSR* **200** (3), 560 (1975).
4. E. D. Korop, B. E. Meierovich, Yu. V. Sidelnikov, and S. T. Sukhorukov, *UFN* **129** (6), 87 (1979).
5. V. A. Veretennikov, S. N. Polukhin, O. G. Semenov, and Yu. V. Sidelnikov, *Plasma Physics* **7** (6), 1199 (1981).
6. P. S. Antsiferov, K. N. Koshelev, V. I. Krauz et al., *Plasma Physics* **16** (11), 1319 (1990).
7. A. N. Dolgov, *Emission of particles and radiation in a micropinch discharge* / Dis. doct. phys.-mat. nauk (Moscow Engineering Physics Institute (State University), Moscow, 2005).
8. S. A. Pikuz, *X-pinch. Experimental studies* / Dis. doct. phys. (Lebedev Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 2007).
9. E. O. Baronova, *Development of X-ray spectroscopy methods and their application in high-current discharge plasma studies* / Dis. doct. phys.-mat. sci. (RSC "Kurchatov Institute", Institute of Nuclear Fusion, Moscow, 2009).
10. V. V. Vikhrev, V. V. Ivanov, and K. N. Koshelev, *Plasma Physics* **8** (6), 1211 (1982).
11. S. I. Blinnikov and V. S. Imshennik, *Plasma Physics* **8** (1), 193 (1982).
12. V. A. Veretennikov, A. I. Isakov, O. N. Krokhin, O. G. Semenov, and Yu. V. Sidelnikov, *Preprint FIAN USSR*, No. 59 (1983), p. 20.
13. J. Bailey, A. Fischer, and N. Rostoker, *J. Appendix. Physics* **60** (6), 1939 (1986).
14. V. I. Oreshkin, *Izv. vuzov Fiz.* **40** (12), 76 (1997).
15. L. Bernal and H. Bruzzone, *Plasma Physics and Vice versa. Merge* **44** (2), 223 (2002).
16. A. N. Dolgov and D. E. Prokhorovich, *Physicochemical kinetics in gas dynamics* **16** (2), 2 (2015).
17. V. V. Averkiev, A. N. Dolgov, V. K. Lyapidevsky, A. S. Savelov, and G. H. Salakhutdinov, *Plasma physics* **18** (6), 724 (1992).
18. B. N. Mironov, *Plasma Physics* **20** (6), 546 (1994).
19. B. N. Mironov, *Plasma Physics* **20** (10), 886 (1994).
20. M. Nishio, H. Sakuma, and K. Takasugi, *Studies of plasma and thermonuclear fusion: Rapid communications* **6**, 1201009 (2011). DOI: 10.1585/pfr.6.1201009.
21. S. S. Ananiev, S. A. Danko, V. V. Myalton, U. G. Kalinin, V. I. Krauz, V. P. Vinogradov, and Yu. V. Vinogradova, *VANT. Ser. Thermonuclear fusion* **36** (4), 102 (2013).
22. A. A. Gorbunov, M. A. Gulin, A. N. Dolgov, O. V. Nikolaev, and A. S. Savelov, *Letters in the JETP* **50** (7), 320 (1989).
23. M. A. Gulin, A. N. Dolgov, N. N. Kirichenko, and A. S. Savelov, *Pis'ma V Zh.* **108** (10), 1309 (1995).
24. Mei Wu, Li Chen, and Ti-Pei Li, *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics* **5** (1), 57 (2005).
25. A. N. Dolgov, N. A. Klyachin, and D. E. Prokhorovich, *Plasma Physics* **45** (7), 621 (2019).
26. A. N. Dolgov, N. V. Zemchenkova, N. A. Klyachin, and D. E. Prokhorovich, *Applied Physics*, No. 1, 68 (2012) [in Russian].
27. V. V. Kremnev and G. A. Mesiats, *Methods of multiplication and transformation of pulses in high-current electronics* (Novosibirsk, 1987).
28. *Plasma diagnostics* / Edited by R. Huddlestone and S. Leonard. Translated from English / Edited by S. Yu. Lukyanov. (Publishing house "MIR", Moscow, 1967).
29. A. N. Dolgov, N. A. Klyachin, and D. E. Prokhorovich, *Applied Physics*, No. 5, 26 (2018) [in Russian].
30. M. A. Blokhin and I. G. Schweitzer, *X-ray spectral reference book* ("Science", The Main edition of physical and mathematical literature, Moscow, 1982).
31. A. N. Dolgov, N. N. Kirichenko, V. K. Lyapidevsky, A. S. Savelov, and G. H. Salakhutdinov, *Plasma Physics* **19** (1), 97 (1993).
32. M. A. Gulin, A. N. Dolgov, O. V. Nikolaev, and A. S. Savelov, *Plasma Physics* **16** (8), 1015 (1990).
33. V. A. Veretennikov, A. N. Dolgov, O. N. Krokhin, and O. G. Semenov, *Plasma Physics* **11** (8), 1107 (1985).
34. T. N. Li, *Annals of the New York Academy of Sciences* **251**, 112 (1975).
35. I. Afonin, *Plasma Physics* **21** (7), 648 (1995).
36. A. N. Dolgov, *Plasma Physics* **31** (6), 539 (2005).
37. A. N. Dolgov and V. V. Vikhrev, *Plasma Physics* **31** (3), 290 (2005).
38. A. N. Dolgov, N. A. Klyachin, and D. E. Prokhorovich, *Plasma Physics* **42** (12), 1057 (2016).
39. A. N. Dolgov, N. V. Zemchenkova, N. A. Klyachin, and N. A. Prokhorovich, *Plasma Physics* **36** (8), 826 (2010).
40. A. N. Dolgov, N. A. Klyachin, and D. E. Prokhorovich, *Letters in ZhTF* **40** (3), 7 (2014).
41. N. P. Kozlov, *Fundamentals of Plasma Physics* (Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 1997).
42. D. A. Frank-Kamenetsky, *Lectures on plasma physics* (Atomizdat, Moscow, 1968).
43. L. Spitzer, *Physics of fully ionized gas* (Mir, Moscow, 1965).
44. M. A. Gulin, A. N. Dolgov, N. N. Kirichenko, V. K. Lyapidevskii, N. V. Maslennikova, and A. S. Savelov, *PTE*, No. 6, 82 (1996).
45. A. N. Dolgov, N. V. Semchenkova, N. A. Klyachin, and D. E. Prokhorovich, *Plasma Physics* **37** (3), 194 (2011).
46. V. V. Vikhrev, V. V. Ivanov, and G. A. Rozanova, *Nucl. Merge.* **33** (2), 311 (1993).