

УДК 53.09; 53.043
EDN: JAFQAD

PACS: 07.50.-e; 37.10.Ty

Траектории микрочастиц разных знаков в квадрупольной ловушке с напряжением прямоугольной формы

М. С. Доброклонская, В. Я. Печеркин, В. И. Владимиров, Л. М. Василяк

Проведены экспериментальные исследования и компьютерное моделирование влияния знака заряда диэлектрических микрочастиц на траектории их движения в линейной квадрупольной ловушке с импульсно-периодическим знакопеременным удерживающим напряжением прямоугольной формы с частотой 50 Гц в воздухе при атмосферном давлении. Обнаружено, что в отличие от синусоидального удерживающего напряжения, траектории частиц в поперечном сечении ловушки располагаются по диагоналям, причем частицы с зарядами разных знаков осциллируют вдоль перпендикулярных диагоналей. При изменении коэффициента заполнения положительной полярности прямоугольного импульса более 50 % меняется диагональ движения частиц в зависимости от знака их заряда. Эффект получен экспериментально и согласуется с расчетом.

Ключевые слова: заряженные частицы, линейная электродинамическая квадрупольная ловушка, удержание частиц, траектории движения, воздух при атмосферном давлении, напряжение прямоугольной формы.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-5-99-104

Введение

Линейная квадрупольная электродинамическая ловушка получила широкое применение в качестве эффективного устройства для захвата и удержания нано- и микрочастиц в вакууме и при атмосферном давлении в газовой среде, что объясняется простотой конструкции, возможностью длительного удер-

жания стабильных кулоновских структур заряженных частиц, простотой регистрации частиц при лазерном освещении. Электродинамические ловушки являются основным инструментом в масс-спектрометрии для изучения элементного состава микроструктур, спектральных свойств одиночных частиц микрочастиц, атомарных и молекулярных ионов и исследования ионных реакций [1]. Такой подход позволяет различать индивидуальные особенности отдельных частиц и исследовать физические процессы, происходящие как в объеме, так и на поверхности нано- и микроструктур [2]. Линейные электродинамические ловушки позволяют исследовать кулоновские структуры с большим количеством частиц при атмосферном давлении [3–5], определять их свойства [6–8], создавать генерацию уединенных волн плотности и исследовать их свойства [9], осуществлять селекцию и сепарацию полидисперсных смесей частиц по размерам [10], проводить бесконтактную

Доброклонская Марина Сергеевна, аспирант.
Печеркин Владимир Яковлевич, с.н.с., к.ф.-м.н.
E-mail: vpecherkin@yandex.ru

Владимиров Владимир Иванович, с.н.с.
Василяк Леонид Михайлович, гл.н.с., д.ф.-м.н.
Объединенный институт высоких температур РАН.
Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

Статья поступила в редакцию 18.09.2024
После доработки 2.10.2024
Принята к публикации 11.10.2024
Шифр научной специальности: 1.3.9

© Доброклонская М. С., Печеркин В. Я.,
Владимиров В. И., Василяк Л. М., 2024

очистку различных поверхностей [11], измерять заряды одиночных частиц [12]. Новым направлением применения ловушек может быть оперативное определение размеров и заряда частиц по траекториям движения в воздухе [13, 14]. Поведение кулоновских систем и отдельных микрочастиц в квадрупольной линейной ловушке хорошо изучено для гармонической формы напряжения на электродах. В предыдущей работе [15] мы провели сравнение режимов удержания заряженных диэлектрических частиц микронного размера в линейной квадрупольной электродинамической ловушке при гармоническом и знакопеременном периодическом напряжении прямоугольной формы. Цель настоящей работы – провести компьютерное моделирование и экспериментальные исследования влияния знака заряда частиц на траектории их движения в воздухе при атмосферном давлении в случае знакопеременного напряжения прямоугольной формы.

Численное моделирование

Ранее в наших работах было проведено численное моделирование траекторий частиц при гармоническом напряжении [14] и при напряжении прямоугольной формы [15, 16]. В настоящей работе используется аналогичная методика расчета для диэлектрических частиц Al_2O_3 размером 9 мкм с зарядом 8300 e , где e – заряд электрона. Траектория движения частицы в сечении, перпендикулярном оси ловушки определялась путем численного решения уравнения Ланжевена $ma = F_e + F_g + F_f + F_s$, где F_e – сила электрического поля ловушки, F_g – сила гравитации, F_f – сила трения частицы о воздух, F_s – стохастический член, обусловленный столкновениями с молекулами воздуха. Сила трения F_s задана формулой Стокса $F_f = -6\pi\mu r v$, где r – радиус частицы, μ – вязкость воздуха, v – скорость частицы, воздух в ловушке неподвижен. Начальное положение частицы при расчете задавалось в центре ловушки, в точке с координатами (0,0), с нулевой начальной скоростью. Расчет выполнен для коэффициента заполнения прямоугольного импульса положительной полярности K_p 40 % и 60 %. Изменялась только длительность положительного полупериода,

при этом общая длительность положительного и отрицательного импульса всегда составляла 20 мс, т. е. регулировался коэффициент заполнения импульса положительной полярности.

Эксперимент

Схема эксперимента аналогична использованной нами ранее в работах [14, 15]. Ловушка состоит из четырех цилиндрических стальных стержней диаметром 4 мм длиной 10 см, расположенных в углах квадрата со стороной 2 см. На пары диагональных линейных электродов прикладывается знакопеременное импульсно-периодическое напряжение прямоугольной формы с частотой 50 Гц и регулируемой амплитудой до 10 кВ. Генератор импульсов позволяет регулировать коэффициент заполнения импульсов положительной или отрицательной полярности.

Зарядка исследуемых микрочастиц осуществлялась индукционным способом от высоковольтных источников постоянного напряжения положительной или отрицательной полярности в диапазоне до 10 кВ. Для зарядки диэлектрические микрочастицы Al_2O_3 с размерами 9–20 мкм насыпаются тонким слоем на металлическую пластину, на которую затем подается высокое напряжение положительной или отрицательной полярности. Пластина с заряженными частицами либо подносится к нижним электродам для захвата частиц ловушкой, либо частицы засыпаются в ловушку сверху. Распределение захваченных частиц по размеру исследовано нами ранее в работе [14].

Регистрация частиц и их траекторий производилась CCD камерой с частотой 15 кадров в секунду с торца ловушки. Ось камеры располагалась вдоль оси ловушки. Подсветка частиц осуществлялась плоским лазерным лучом (лазерным ножом) толщиной 2 мм в области наблюдения на длине волны 532 нм. Мощность излучения лазера 300 мВт.

Результаты и обсуждение

Модельные и экспериментальные устойчивые траектории частиц размером 9 мкм с зарядом 8300 e в поперечном сечении ловуш-

ки для коэффициента заполнения импульса положительной полярностью $K_p = 40\%$ при амплитуде 6 кВ представлены на рисунке 1 и рисунке 2, соответственно. Рассчитанные траектории частиц с положительным зарядом показаны на рисунке 1а и отрицательным зарядом на рисунке 1б, в сечении, перпендикулярном оси ловушки. На рисунке 2 показаны экспериментально зарегистрированные траектории диэлектрических частиц с положительным зарядом (рис. 2а) и отрицательным заря-

дом (рис. 2б). На рисунке 1а и рисунке 2а видно, что при положительном заряде частиц траектории их движения в ловушке направлены вдоль одной из диагоналей между электродами с одинаковым потенциалом. На рисунке 1б и рисунке 2б видно, что при отрицательном заряде частиц траектории их движения направлены вдоль диагонали между электродами с противоположным потенциалом, которая перпендикулярна диагонали на рисунке 1а и рисунке 2а.

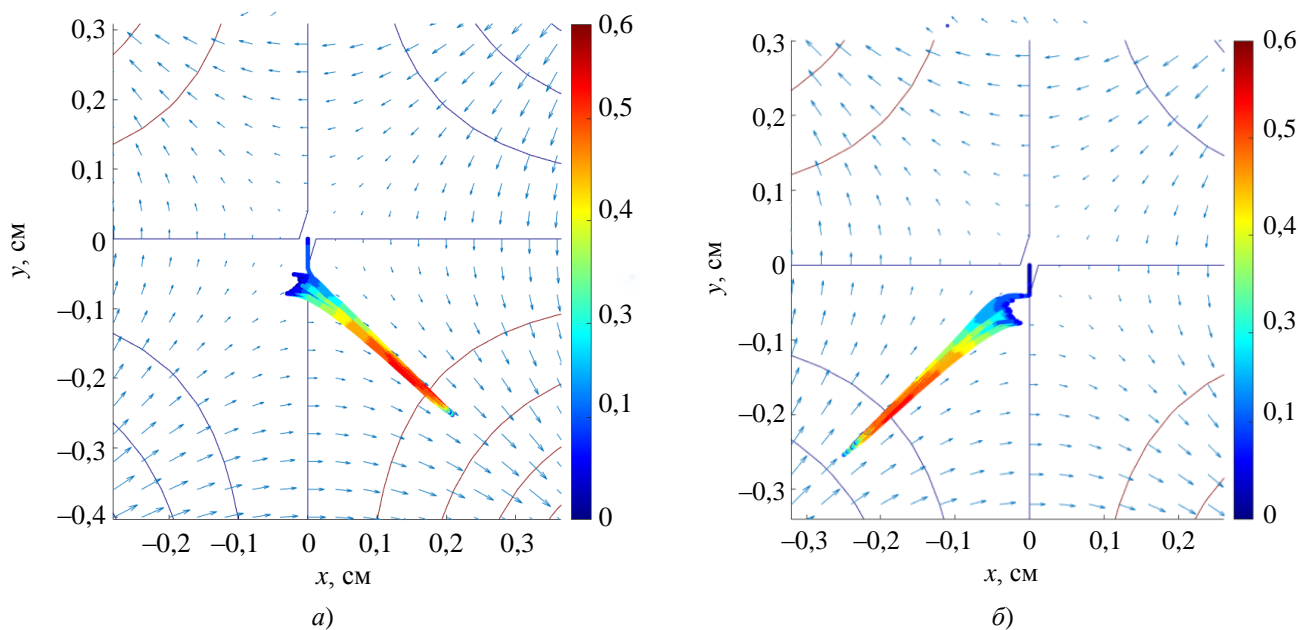


Рис. 1. Рассчитанные траектории. $K_p = 40\%$. а) – заряд частиц положительный, б) – отрицательный

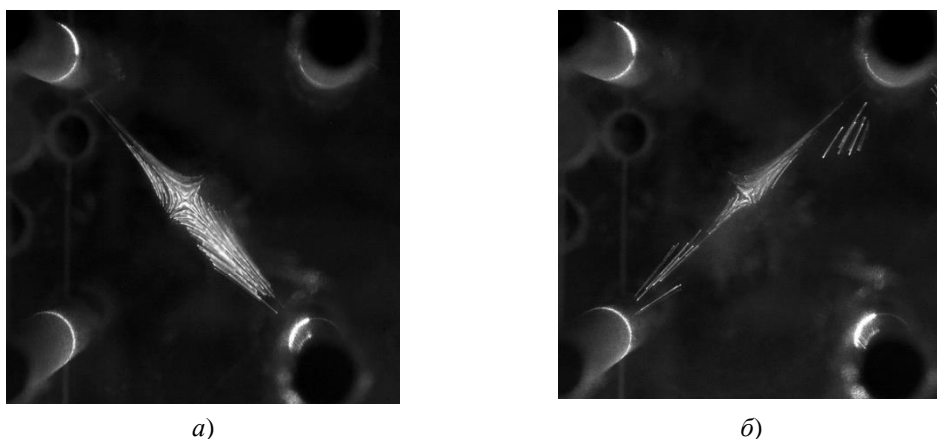


Рис. 2. Фото траекторий. $K_p = 40\%$. а) – заряд положительный, б) – отрицательный

Аналогичные результаты для коэффициента заполнения импульса положительной полярностью 60% представлены на рисунке 3 и рисунке 4. На рисунке 3а и рисунке 4а показано, что при переходе коэффициента заполнения

импульса положительной полярностью через величину 50% траектории частиц как при положительном, так и при отрицательном заряде частиц изменили диагонали движения на перпендикулярные, и траектории осцилляций частиц

стали перпендикулярными к траекториям, показанным на рисунке 1а и рисунке 2а. Экспериментально зарегистрированные траектории показаны на рисунке 4. Видно, что для частиц с одинаковыми знаками наклон траекторий на рисунке 4 стал перпендикулярен траекториям на рисунке 2. Для частиц одного знака, как с по-

ложительным, так и отрицательным зарядом изменение коэффициента заполнения импульса положительной полярностью с 40 % до 60 % приводит к смене траектории частиц с одной диагонали на другую. Полученные формы траекторий отличаются от траекторий частиц при гармоническом напряжении.

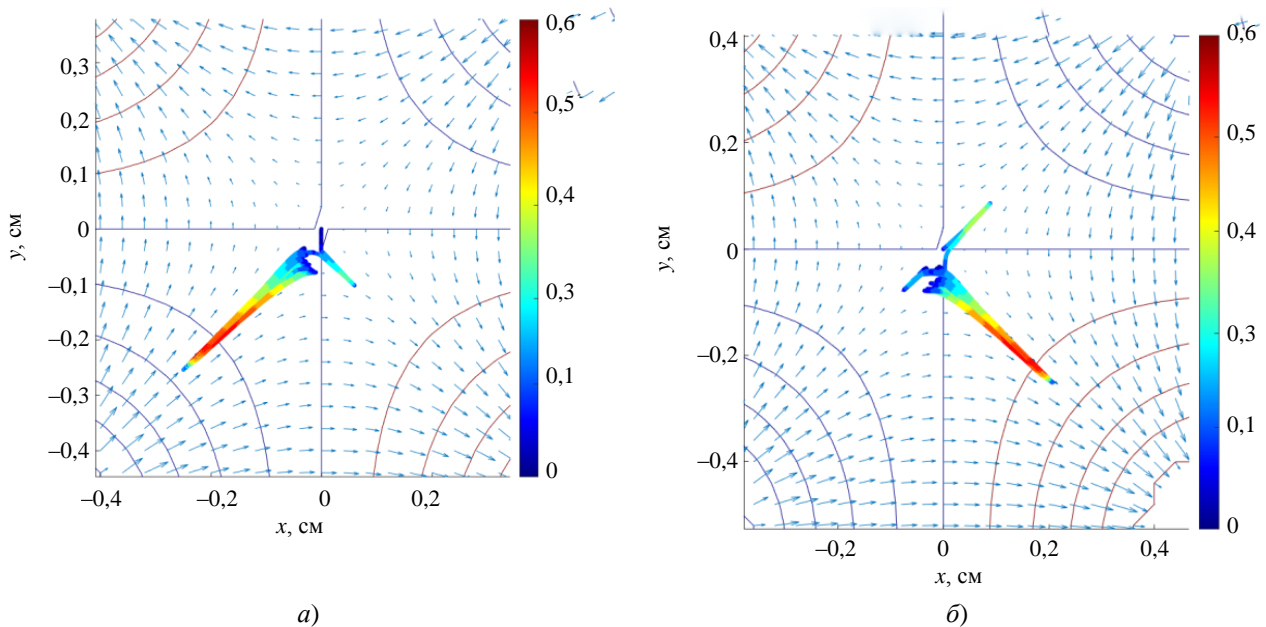


Рис. 3. Рассчитанные траектории. $K_p = 60\%$. а) – заряд частиц положительный, б) – отрицательный

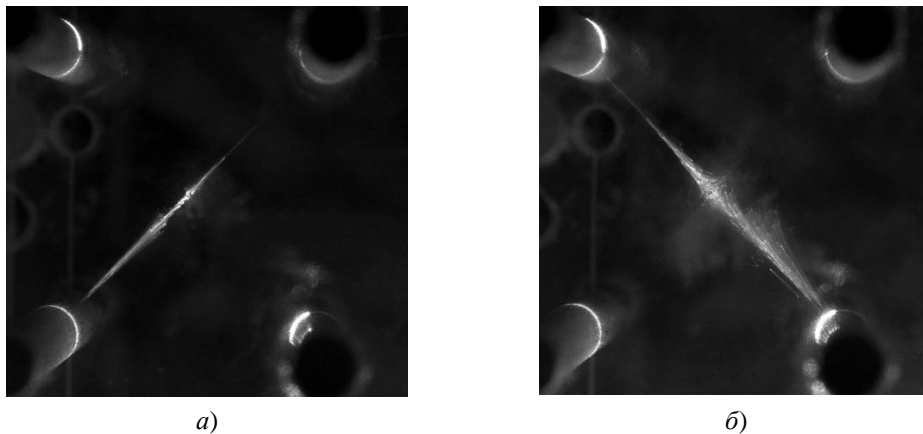


Рис. 4. Фото траекторий. $K_p = 60\%$. а) – заряд положительный, б) – отрицательный

Заключение

Компьютерное моделирование и экспериментальные исследования влияния знака заряда частиц на их траектории в линейной квадрупольной ловушке с импульсным знакопеременным удерживающим напряжением прямоугольной формы в поперечном сечении показали, что формы траекторий отличаются

от траекторий частиц при гармоническом напряжении. Обнаружено, что при постоянных значениях частоты следования импульсов, амплитуды удерживающего напряжения и коэффициента заполнения положительной полярности прямоугольного импульса движение частиц происходит вдоль одной из диагоналей между линейными электродами. В зависимости от знака заряда меняется диагональ

движения. Для частиц одного знака, как с положительным, так и отрицательным зарядом при уменьшении или увеличении коэффициента заполнения относительно 50 % меняется диагональ, вдоль которой происходит движение частиц. Результаты расчетов согласуются с экспериментом. Обнаруженный эффект можно использовать как метод диагностики знака заряда частиц, для управления одиночными частицами и кулоновскими системами заряженных частиц, для сепарации частиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации (Государственное задание
№ 075-00270-24-00).

ЛИТЕРАТУРА

1. Wester R. / Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. 2009. Vol. 42. № 15. P. 154001.
2. Rainò G. et al. / Nat. Commun. 2022. Vol. 13. № 1. P. 2587.
3. Syrovatka R. A., Vasilyak L. M., Deputatova L. V., Filinov V. S., Lapitsky D. S., Pecherkin V. Ya., Vladimirov V. I. / Contrib. Plasma Phys. 2016. Vol. 56. № 3–4. P. 321.
4. Rudyi S., Vasilyev M., Rybin V., Rozhdestvensky Y. / Int. J. Mass Spectrom. 2022. Vol. 479. P. 116894.
5. Mihalcea B. M., Filinov V. S., Syrovatka R. A., Vasilyak L. M. / Phys. Rep. 2023. Vol. 1016. P. 1.
6. Vasilyak L. M., Vladimirov V. I., Deputatova L. V., Lapitsky D. S., Molotkov V. I., Pecherkin V. Ya., Filinov V. S., Fortov V. E. / New J. Phys. 2013. Vol. 15. P. 043047.
7. Rybin V., Rudyi S., Kokorina O. / Vibroengineering PROCEDIA. 2020. Vol. 32. P. 156.
8. Major F. G., Gheorghe V. N., Werth G. Charged Particle Traps. Physics and Techniques of Charged Particle Field Confinement. – Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
9. Syrovatka R., Medvedev Yu., Filinov V., Vasilyak L., Deputatova L., Vladimirov V., Pecherkin V. / Phys. Lett. A. 2019. Vol. 383. P. 338
10. Доброклонская М. С., Василяк Л. М., Владимиров В. И., Печеркин В. Я., Понов Д. И. / Прикладная физика. 2023. № 3. С. 39.
11. Syrovatka R. A., Filinov V. S., Vasilyak L. M., Pecherkin V. Ya., Deputatova L. V., Vladimirov V. I., Popel O. S., Tarasenko A. B. / J. Electrostat. 2021. Vol. 112. P. 103583.
12. Syrovatka R. A., Deputatova L. V., Filinov V. S., Lapitsky D. S., Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M., Vladimirov V. I. / Contrib. Plasma Phys. 2016. Vol. 56. Issue 5. P. 419.
13. Rybin V., Rudyi S., Rozhdestvensky Y. / Int. J. Non-Linear Mech. 2022. Vol. 147. P. 104227.
14. Доброклонская М. С., Василяк Л. М., Владимиров В. И., Печеркин В. Я. / Прикладная физика. 2023. № 2. С. 29–34.
15. Доброклонская М. С., Печеркин В. Я., Владимиров В. И., Василяк Л. М. / Прикладная физика. 2024. № 3. С. 93–98.
16. Доброклонская М. С., Печеркин В. Я., Владимиров В. И., Василяк Л. М. / Прикладная физика. 2024. № 4. С. 96–100.

PACS: 07.50.-e; 37.10.Ty

Trajectories of different signs microparticles in a quadrupole trap with a rectangular shape voltage

M. S. Dobroklonskaya, V. Ya. Pecherkin, V. I. Vladimirov and L. M. Vasilyak

Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences
Bd. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia
E-mail: vpecherkin@yandex.ru

Received 18.09.2024; revised 2.10.2024; accepted 11.10.2024

Experimental studies and computer modeling of the charge sign effect of dielectric microparticles on their movement trajectories in a linear quadrupole trap with a pulse-periodic alternating retaining voltage of a rectangular shape with a frequency of 50 Hz in air at atmospheric pressure have been carried out. It was found that, unlike the sinusoidal holding voltage, the trajectories of particles in the cross section of the trap are arranged diagonally, and particles

with charges of different signs oscillate along perpendicular diagonals. When the filling factor of the positive polarity of a rectangular pulse changes by more than 50 %, the diagonal of the particles motion changes depending on the sign of their charge. The effect was obtained experimentally and is consistent with the calculation.

Keywords: charged particles, linear electrodynamic quadrupole trap, particle trapping, trajectories of motion, air at atmospheric pressure, rectangular voltage.

REFERENCES

1. Wester R., Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics **42** (15), 154001 (2009).
2. Rainò G. et al., Nat. Commun. **13** (1), 2587 (2022).
3. Syrovatka R. A., Deputatova L. V., Filinov V. S., Lapitsky D. S., Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M. and Vladimirov V. I., Contributions to Plasma Physics **56** (3–4), 321 (2016).
4. Rudyi S., Vasilyev M., Rybin V. and Rozhdestvensky Y., International Journal of Mass Spectrom. **79**, 116894 (2022).
5. Mihalcea B. M., Filinov V. S., Syrovatka R. A. and Vasilyak L. M., Physics Reports **1016**, 1 (2023).
6. Vasilyak L. M., Vladimirov V. I., Deputatova L. V., Lapitsky D. S., Molotkov V. I., Pecherkin V. Ya., Filinov V. S. and Fortov V. E., New Journal of Physics **15**, 043047 (2013).
7. Rybin V., Rudyi S. and Kokorina O., Vibroengineering PROCEDIA **32**, 156 (2020).
8. Major F. G., Gheorghie V. N. and Werth G. Charged Particle Traps. Physics and Techniques of Charged Particle Field Confinement. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
9. Syrovatka R., Medvedev Yu., Filinov V., Vasilyak L., Deputatova L., Vladimirov V. and Pecherkin V., Physics Letters A **383**, 338 (2019).
10. Dobroklonskaya M. S., Vasilyak L. M., Vladimirov V. I., Pecherkin V. Ya. and Popov D. I., Applied Physics, № 3, 39 (2023) [in Russian].
11. Syrovatka R. A., Filinov V. S., Vasilyak L. M., Pecherkin V. Ya., Deputatova L. V., Vladimirov V. I., Popel O. S. and Tarasenko A. B., Journal of Electrostatics **112**, 103583 (2021).
12. Syrovatka R. A., Deputatova L. V., Filinov V. S., Lapitsky D. S., Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M. and Vladimirov V. I., Contributions to Plasma Physics **56** (5), 419 (2016).
13. Rybin V., Rudyi S. and Rozhdestvensky Y., International Journal of Non-Linear Mechanics **147**, 104227 (2022).
14. Dobroklonskaya M. S., Vasilyak L. M., Vladimirov V. I. and Pecherkin V. Ya., Applied Physics, № 2, 29–34 (2023) [in Russian].
15. Dobroklonskaya M. S., Pecherkin V. Ya., Vladimirov V. I. and Vasilyak L. M., Applied Physics, № 3, 93–98 (2024) [in Russian].
16. Dobroklonskaya M. S., Pecherkin V. Ya., Vladimirov V. I. and Vasilyak L. M., Applied Physics, № 4, 96–100 (2024) [in Russian].