

## Физическая электроника

Научная статья

УДК 621.384.8

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16204>

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОКУСИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ДИАФРАГМ В ИОННОМ ИСТОЧНИКЕ С КОРОННЫМ РАЗРЯДОМ

Т. В. Помозов , М. З. Мурадымов, Е. А. Ткач

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, Россия

 [tim-kor@mail.ru](mailto:tim-kor@mail.ru)

**Аннотация.** Проведено экспериментальное исследование транспортировки пучка заряженных частиц в ионном источнике с коронным разрядом, с фокусирующей системой на основе тонких диафрагм в стоячем газе при атмосферном давлении. Показано, что эффективность транспортировки ионного пучка через систему фокусировки зависит от расстояния между коронирующим острием и системой диафрагм, разности потенциалов между диафрагмами фокусирующей системы и величины тока коронного разряда. Представлены результаты сравнения эффективности транспортировки ионного пучка в ионном источнике с фокусирующей системой и без нее. Использование фокусирующей системы позволяет в несколько раз увеличить ток, приходящий на коллектор через диафрагму наименьшего диаметра, и повысить на порядок ток, приходящий на плоскость этой диафрагмы.

**Ключевые слова:** ионный источник, масс-спектрометр, коронный разряд, фокусирующая система, транспортировка ионов

**Финансирование.** Работа выполнена частично в рамках НИОКТР FFZM-2022-0009, входящей в состав Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00761-22-00 для ИАП РАН.

**Для цитирования:** Помозов Т. В., Мурадымов М. З., Ткач Е. А. Эффективность фокусирующей системы на основе тонких диафрагм в ионном источнике с коронным разрядом // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2023. Т. 16. № 2. С. 52–60. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16204>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16204>

### THE EFFICIENCY OF A FOCUSING SYSTEM BASED ON THIN DIAPHRAGMS IN THE ION SOURCE WITH A CORONA DISCHARGE

T. V. Pomozov , M. Z. Muradymov, E. A. Tkach

Institute for Analytical Instrumentation of RAS, St. Petersburg, Russia

 [tim-kor@mail.ru](mailto:tim-kor@mail.ru)

**Abstract.** In this work, a charged particle beam transport in an ion source with a corona discharge, the source being equipped with a focusing system based on thin diaphragms in the standing gas and at atmospheric pressure, has been studied experimentally. The efficiency of the ion beam transportation through the focusing system was shown to depend on the distance



between the corona needle and the diaphragm system, on the potential difference between the diaphragms of the focusing system and on the value of the corona discharge current. The results of comparing the efficiency of the ion beam transport in the ion source with using the focusing system and without it are presented. The use of the focusing system allowed to increase several times the current entering the collector through the diaphragm of the smallest diameter, and to raise the current entering the plane of this diaphragm by an order of magnitude.

**Keywords:** ion source, mass spectrometer, corona discharge, focusing system, ion transport

**Funding:** The research was partially funded within the Research Work No. 0074-2019-0009 being a part of The State Assignment No. 075-00780-19-02 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation to the Institute for Analytical Instrumentation of Russian Academy of Sciences.

**For citation:** Pomozov T. V., Muradymov M. Z., Tkach E. A., The efficiency of a focusing system based on thin diaphragms in the ion source with a corona discharge, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 16 (2) (2023) 52–60. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16204>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

### Введение

Источники ионизации при атмосферном давлении давно и широко используются в масс-спектрометрии при решении задач органической и биологической химии, фармакологии, протеомики, экологии и т. п. [1 – 3].

Чувствительность масс-спектрометра зависит от эффективности транспортировки ионного пучка из области ионообразования с атмосферным давлением в высоковакуумную область масс-анализа через газодинамический интерфейс, состоящий из системы дифференциальной откачки (СДО) с размещенными в ней ионно-оптическими элементами. Потери ионов существуют на всех ступенях СДО, однако максимальные потери ионного пучка приходится на переход из области с атмосферным давлением через сопло в первую ступень СДО и могут составлять два порядка и более от суммарного тока источника ионов [4].

Перспективным способом снижения потерь ионов является фокусировка ионного пучка на сопло. В работе [5] такую фокусировку осуществляли размещением полусферического сеточного электрода между распылительным капилляром и соплом. Такое решение имело целый ряд недостатков, в частности ограниченную прозрачность сеток и искажение полевой структуры из-за осаждения микрокапель. В работах [6 – 8] фокусировку ионного пучка осуществляли с помощью дополнительного электрода (диафрагмы), установленного перед соплом; при этом отношение диаметра отверстия диафрагмы к ее толщине составляло от 1 до 5.

Однако результаты численного моделирования ионных траекторий в электростатических полях в плотном газе показывают, что с точки зрения эффективности фокусировки ионного пучка наиболее перспективными являются фокусирующие системы на основе тонких диафрагм (указанное выше отношение должно составлять несколько десятков). Ионно-оптическая схема такой фокусирующей системы рассмотрена в работе [9], где предложена электродная конфигурация на основе тонких диафрагм (толщиной 0,1 мм) с уменьшающимися диаметрами отверстий. Выбор в пользу применения как можно более тонких диафрагм диктуется более выраженными фокусирующими свойствами системы ввиду отсутствия локальных областей дефокусировки в каналах апертур.

В настоящей работе экспериментально исследуется возможность увеличения эффективности транспортировки ионного пучка с помощью фокусирующей системы на основе тонких диафрагм в источнике с коронным разрядом в стоячем газе. Таким образом, эффективность транспортировки должна повыситься исключительно за счет фокусировки ионов в электростатическом поле. В газодинамическом интерфейсе масс-спектрометра

диафрагма фокусирующей системы с наименьшим диаметром становится соплом, отделяющим область атмосферного давления от первой ступени СДО.

### Ионно-оптическая схема фокусирующей системы на основе тонких диафрагм в источнике с коронным разрядом

Ионно-оптическая схема экспериментально исследуемой фокусирующей системы на основе тонких диафрагм в источнике с коронным разрядом показана на рис. 1. Схема состоит из коронирующего острия (иглы), четырех тонких диафрагм ( $d_1 - d_4$ ) толщиной 0,1 мм с уменьшающимися размерами отверстий и плоского электрода, выполняющего функцию коллектора. Размеры отверстий диафрагм по убывающей составляют, мм: 4,00; 2,65; 1,20 и 0,50. Расстояния между тонкими диафрагмами и расстояние между последней диафрагмой и коллектором составляют 1 мм. К коронирующему острию прикладывается потенциал  $U_n$  для зажигания разряда, а к коллектору – некоторый тянущий потенциал  $U_c$ . В системе с дифференциальной откачкой, апертурой, отделяющей область с атмосферным давлением от первой ступени СДО и выполняющей роль сопла, будет диафрагма 4, имеющая наименьший диаметр.

При приложении одинаковой разности потенциалов между соседними диафрагмами  $\Delta U < 0$  ( $\Delta U = U_{i+1} - U_i$ ,  $i = 1 - 3$ ) для положительно заряженных ионов рассматриваемая система обладает фокусирующими свойствами, поскольку напряженность электростатического поля в промежутках между соседними диафрагмами увеличивается вследствие уменьшения диаметров апертур. На рис. 1 показаны также эквипотенциальные линии электростатического поля в плоскости, проходящей через оптическую ось, траектории положительно заряженных ионов; в подписи перечислены геометрические и электрические параметры ионно-оптической схемы и указаны их значения.

Численное моделирование электростатического поля и траекторий заряженных частиц в плотном газе (воздух) при нормальных условиях ( $T = 300$  К,  $p = 760$  Торр) без учета

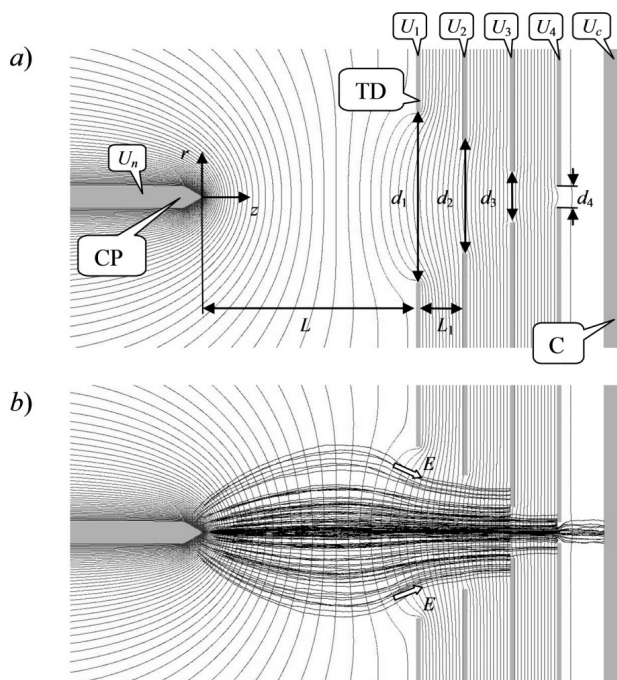


Рис. 1. Ионно-оптическая схема фокусирующей системы на основе тонких диафрагм (a) и траектории положительно заряженных ионов (b):

CP – коронирующее острие (игла), TD – набор тонких диафрагм ( $d_1 - d_4$ ), C – коллектор, а также эквипотенциальные линии электростатического поля  $E$  в плоскости, проходящей через оптическую ось. Геометрические и электрические параметры схемы:  $L = 5$  мм,  $L_1 = 1$  мм,  $d_1 = 4$  мм,  $d_2 = 2,65$  мм,  $d_3 = 1,2$  мм,  $d_4 = 0,5$  мм,  $U_n = 7$  кВ,  $U_1 = 3$  кВ,  $U_2 = 2$  кВ,  $U_3 = 1$  кВ,  $U_4 = 0$  В,  $U_c = -1$  кВ. Толщина диафрагм 1 – 4 составляет 0,1 мм



эффектов, вносимых объемным зарядом, проводилось в программном пакете SIMION 8.0 [10] с использованием статистической диффузионной модели SDS [11], которая представлена в качестве пользовательской программы к пакету. В качестве модельного пучка были взяты положительные ионы азота ( $m = 14$  а.е.м.) с начальным сферическим пространственным распределением ( $d = 1,5$  мм).

Заметим, что фокусирующие свойства исследуемой ионно-оптической схемы зависят от величины разности потенциалов  $\Delta U$ , прикладываемых между тонкими диафрагмами: при увеличении  $\Delta U$  фокусирующие свойства усиливаются, а при уменьшении – ослабевают. Результаты расчетов показывают, что в рассматриваемой ионно-оптической схеме доля ионов, приходящих на коллектор, составляет около 4,2 %, а на плоскость диафрагмы с наименьшим диаметром ( $d_4 = 0,5$  мм) – около 27 %.

### Экспериментальная установка

Для экспериментального исследования эффективности транспортировки ионного пучка в источнике с фокусирующей системой была создана установка, схема которой показана на рис. 2.

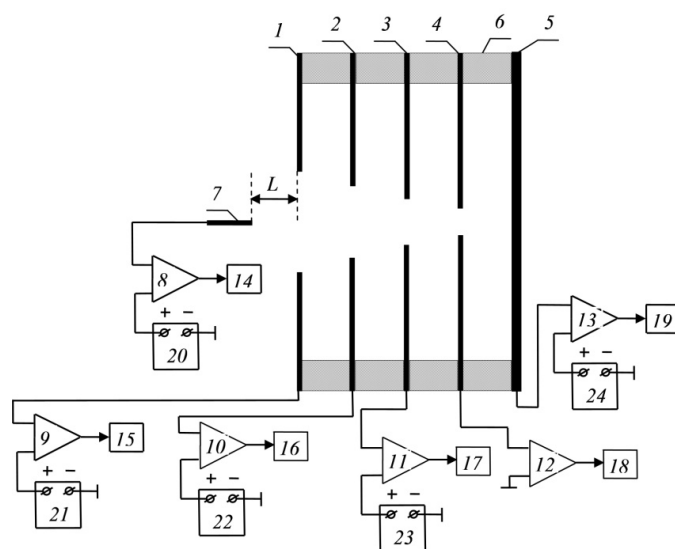


Рис. 2. Схема экспериментальной установки с фокусировкой ионного пучка в системе тонких диафрагм:

1 – 4 – тонкие диафрагмы, 5 – коллектор, 6 – керамические вставки, 7 – коронирующее острие (игла), 8 – 13 – электрометры, 14 – 19 – цифровые измерители токов, 20 – 24 – высокостабильные высоковольтные блоки питания. Толщина тонких диафрагм составляет 0,1 мм, керамических вставок – 1 мм

В данной установке реализована описанная выше ионно-оптическая схема фокусирующей системы, состоящая из коронирующего острия (иглы) 7, соосно расположенной системы тонких диафрагм 1 – 4 толщиной 0,1 мм и коллектора 5. Диаметр отверстия в первой диафрагме (1) составляет 4 мм, во второй (2) – 2,65 мм, в третьей (3) – 1,2 мм, в четвертой (4) – 0,5 мм. Все диафрагмы изолированы друг от друга и от коллектора 5 керамическими вставками 6 толщиной 1 мм. Электроды 1 – 3 и 5, 7 экспериментальной установки имеют независимое электропитание от высоковольтных управляемых высокостабильных блоков питания 20 – 24. Четвертая диафрагма 4 находится под нулевым потенциалом.

Все электроды системы также подключены к электрометрическим усилителям с коэффициентами усиления от  $10^{-6}$  до  $10^{-8}$  А/В, что позволяет измерять протекающий по электродам ток. Коронирующее острие установлено на платформе с механическим приводом, позволяющим варьировать расстояние от острия до ближайшей диафрагмы фокусирующей системы.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

В ходе эксперимента исследовались особенности транспортировки ионного пучка в описанной выше системе (см. рис. 1 и 2) при вариации ее электрических и геометрических параметров, а именно:

$\Delta U$  – величина разности потенциалов между диафрагмами,

$I_d$  – ток коронного разряда,

$L$  – расстояние от коронирующего острия до ближайшей диафрагмы.

В ходе всех экспериментальных измерений контролировалось выполнение условия баланса токов в системе, которое подразумевает равенство тока разряда сумме токов, приходящих на диафрагмы и коллектор. Полученные экспериментальные зависимости с достаточной точностью ( $< 10\%$ ) воспроизводились в независимых сериях измерений.

На рис. 3, *a* и *b* представлены зависимости тока на коллекторе  $I_c$  и суммы токов на четвертой диафрагме и коллекторе  $I_4 + I_c$  от потенциала коллектора  $U_c$  при разных величинах разности потенциалов  $\Delta U$  между диафрагмами при токе положительного коронного разряда  $I_d = 1$  мкА и расстоянии  $L = 6$  мм. Потенциал коллектора варьировали в диапазоне  $0 - -1000$  В, а величину  $\Delta U$  – в пределах от  $-300$  до  $-900$  В. Максимальное значение  $\Delta U = -900$  В практически ограничивалось условием электрического пробоя между диафрагмами при атмосферном давлении.

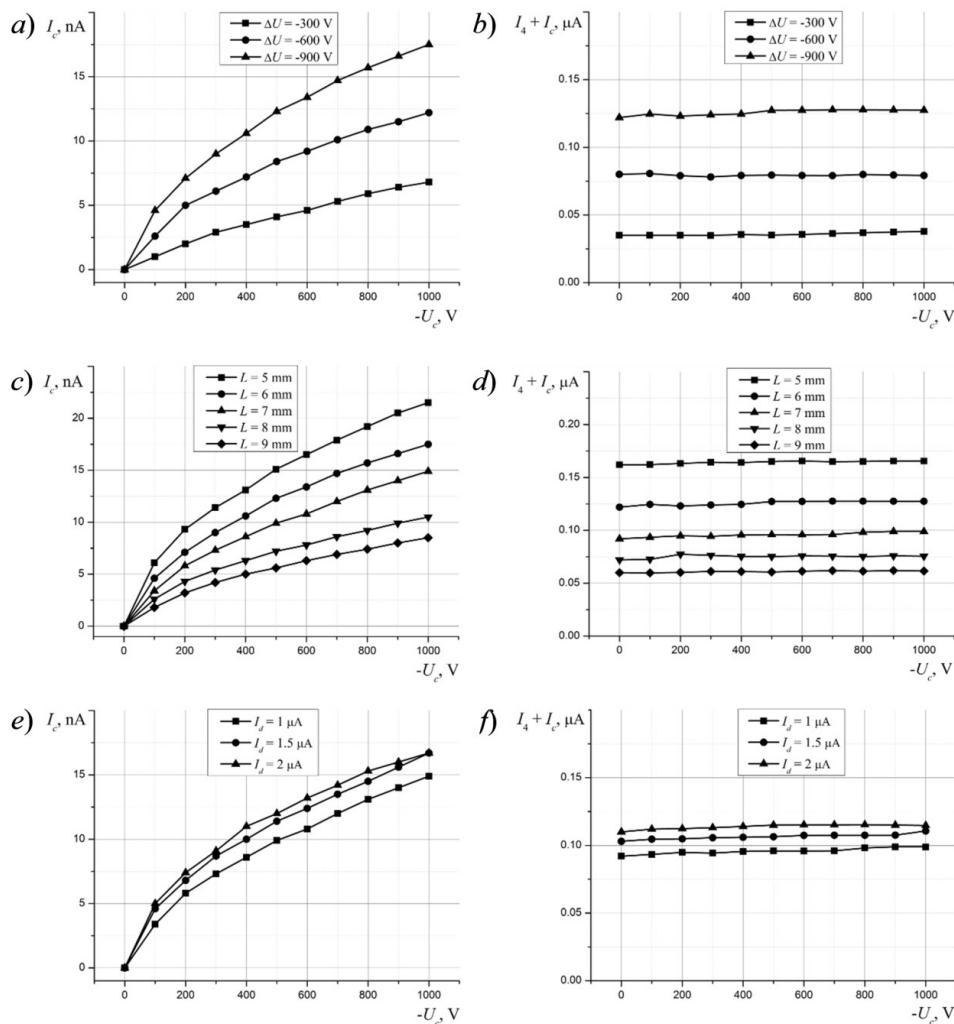


Рис. 3. Токвые характеристики ионного источника с фокусирующей системой при вариации параметров  $\Delta U$  (*a*, *b*),  $L$  (*c*, *d*) и  $I_d$  (*e*, *f*).

Представлены зависимости тока на коллекторе  $I_c$  (*a*, *c*, *e*) и суммы токов  $I_4 + I_c$  (*b*, *d*, *f*) от потенциала коллектора  $U_c$  при фиксированных значениях  $I_d = 1$  мкА и  $L = 6$  мм (*a*, *b*),  $\Delta U = -900$  В и  $I_d = 1$  мкА (*c*, *d*),  $\Delta U = -900$  В и  $L = 7$  мм (*e*, *f*)

Анализ полученных экспериментальных результатов показывает, что разность потенциалов между диафрагмами  $\Delta U$  оказывает существенное влияние на перераспределение токов на диафрагмах системы, что согласуется с результатами численного моделирования. При увеличении разности потенциалов между диафрагмами  $\Delta U$  фокусирующие свойства системы усиливаются: токи  $I_1$  и  $I_2$ , приходящие на первую и вторую диафрагмы, снижаются, тогда как токи  $I_3$  и  $I_4$ , приходящие на третью и четвертую диафрагмы, а также ток  $I_c$ , приходящий на коллектор, возрастают. Увеличение разности потенциалов  $\Delta U$  от  $-300$  до  $-900$  В позволяет достичь роста тока на коллекторе  $I_c$  примерно в 2,5 раза и суммы токов, приходящих на диафрагму 4 и коллектор  $I_4 + I_c$ , – примерно в 3,5 раза при напряжении на коллекторе  $U_c = -1000$  В.

Следует отметить также, что изменение напряжения на коллекторе не оказывает видимого влияния на перераспределение тока между первыми тремя диафрагмами, а влияет лишь на перераспределение тока между четвертой диафрагмой и коллектором.

На рис. 3, *c* и *d* приведены зависимости тока на коллекторе  $I_c$  и суммы токов на четвертой диафрагме и коллекторе  $I_4 + I_c$  от потенциала коллектора  $U_c$  для разных расстояний  $L$  от коронирующего острия до первой диафрагмы при токе коронного разряда  $I_d = 1$  мкА и разности потенциалов между диафрагмами фокусирующей системы  $\Delta U = -900$  В. Как следует из представленных зависимостей, эффективность транспортировки ионного пучка к четвертой диафрагме и на коллектор ухудшается с ростом величины  $L$ : максимальные значения тока на коллекторе  $I_c$  и суммы токов  $I_4 + I_c$  при увеличении расстояния между коронирующим острием и диафрагмой от 5 до 9 мм уменьшаются примерно в 2,5 раза. Этот эффект объясняется увеличением протяженности дефокусирующего участка поля в окрестности области ионообразования при удалении коронирующего острия от системы диафрагм.

На рис. 3, *e* и *f* представлены экспериментальные зависимости для токов  $I_c$  и  $I_4 + I_c$  от потенциала коллектора  $U_c$  для разных значений тока коронного разряда  $I_d$ . При увеличении тока коронного разряда в два раза – от 1 до 2 мкА – ток на коллекторе  $I_c$  и сумма токов  $I_4 + I_c$  увеличиваются по абсолютной величине, но весьма незначительно (в 1,15 раза). Однако отношения токов  $I_c$  и  $I_4 + I_c$  к току коронного разряда  $I_d$  падают приблизительно в 1,7 раза. Наблюдаемое ухудшение эффективности транспортировки ионного пучка с увеличением тока коронного разряда безусловно связано с усилением эффектов объемного заряда, сопровождающихся пространственным уширением ионного пучка.

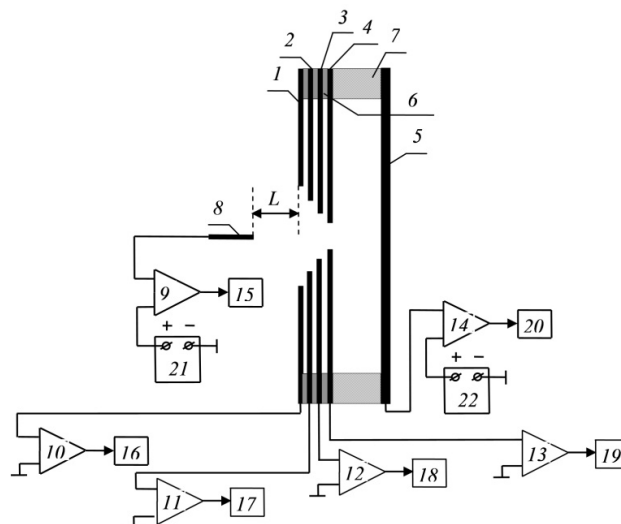


Рис. 4. Схема модифицированной экспериментальной установки с квазиплоским противозлектродом:

1 – 4 – тонкие диафрагмы, 5 – коллектор, 6 – фторопластовые прокладки, 7 – керамическая вставка, 8 – коронирующее острие (игла), 9 – 14 – электрометры, 15 – 20 – цифровые измерители токов, 21 и 22 – высокостабильные высоковольтные блоки питания. Толщина тонких диафрагм и фторопластовых прокладок составляет 0,1 мм, керамической вставки – 1 мм

Эффективность транспортировки ионного пучка в ионном источнике с коронным разрядом с фокусирующей системой логично сравнить с таковой в источнике без фокусирующей системы. Для этой цели фокусирующая схема с тонкими диафрагмами была модифицирована путем замены керамических вставок между диафрагмами на фторопластовые прокладки толщиной 0,1 мм. Таким образом из исходной системы диафрагм был сформирован квази плоский концентрический кольцевой противоэлектрод, находящийся под нулевым потенциалом. Схема модифицированной экспериментальной установки приведена на рис. 4.

Сравнение эффективности транспортировки ионного пучка в исходной (см. рис. 2) и модифицированной (рис. 4) системах проводилось при равных расстояниях  $L$  от коронирующего острия до ближайшей диафрагмы. На рис. 5 представлено сравнение токов на коллекторе  $I_c$  и суммы токов  $I_4 + I_c$  в ионном источнике с фокусирующей системой (при значении  $\Delta U = -900$  В, которое обеспечивало максимально возможный эффект фокусировки) и без нее для разных значений тока коронного разряда  $I_d$  и расстояниях  $L$

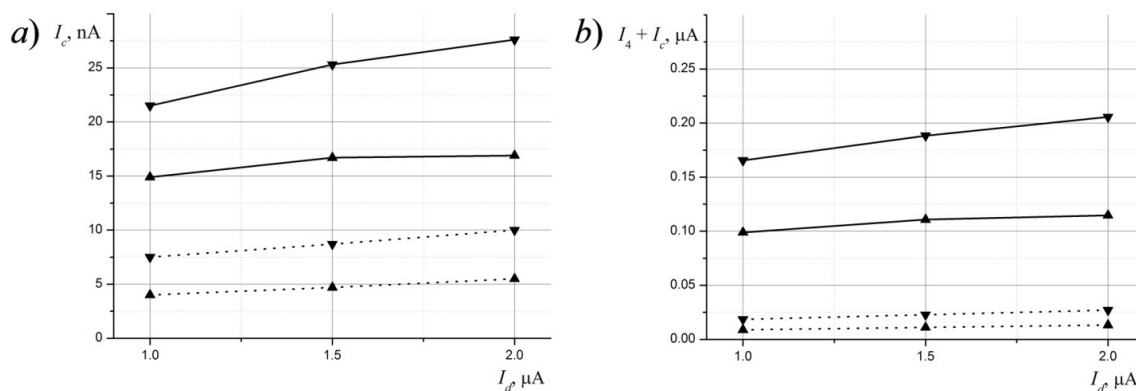


Рис. 5. Сравнение зависимостей тока на коллекторе  $I_c$  (a) и суммы токов  $I_4 + I_c$  (b) в ионном источнике от тока разряда  $I_d$ , полученных с фокусирующей системой ( $\Delta U = -900$  В, сплошные линии) и без нее (точечные линии) при расстояниях  $L = 7$  мм (▲) и 5 мм (▼)

от коронирующего острия до ближайшей диафрагмы. Приведенные экспериментальные результаты свидетельствуют о заметном росте величины тока  $I_c$ , приходящего на коллектор, в схеме с фокусировкой ионного пучка, который увеличивается в 3,0 – 3,7 раза (в зависимости от условий эксперимента). Сумма токов  $I_4 + I_c$ , приходящих на четвертую диафрагму и коллектор, в фокусирующей геометрии превосходит приблизительно на порядок (в 8,3 – 11,1 раза) таковую для ионного источника без фокусировки.

В целом, фокусирующая система в ионном источнике с коронным разрядом позволяет осуществлять транспортировку до 2 % от тока коронного разряда к коллектору через диафрагму наименьшего диаметра (четвертая диафрагма) и до 15 % от тока разряда на плоскость четвертой диафрагмы в стоячем газе.

### Заключение

В работе экспериментально исследованы свойства фокусирующей системы на основе тонких диафрагм в ионном источнике с коронным разрядом (система предложена в работе [9]). Для рассматриваемой системы получены экспериментальные зависимости, характеризующие влияние ее геометрических и электрических параметров на эффективность транспортировки ионов. Эта эффективность возрастает при увеличении разности потенциалов между диафрагмами и снижается при увеличении тока коронного разряда и расстояния от коронирующего острия до системы диафрагм. Сравнение эффективности транспортировки ионов в ионном источнике с использованием фокусирующей системы и без нее показывает, что фокусировка ионного пучка приводит к трехкратному увеличению тока на коллекторе и возрастанию суммы токов, приходящих на диафрагму наименьшего



диаметра и коллектор, примерно на порядок. Этот результат подтверждает правильность подхода к выбору геометрии фокусирующей системы.

Логичным продолжением настоящей работы будет исследование транспортировки ионных пучков в системе диафрагм с учетом газодинамического течения, возникающего в окрестности сопла газодинамического интерфейса масс-спектрометра.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галль Л. Н., Баженов А. Н., Шкуров В. А., Бабаин В. А., Галль Н. Р. Масс-спектрометрия ЭРИАД как новый метод изотопного и элементного анализа // Масс-спектрометрия. 2007. Т. 4. № 1. С. 11–18.
2. Лебедев А. Т. Масс-спектрометрия в органической химии. М: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. 494 с.
3. Covey T. R., Thomson B. A., Schneider B. B. Atmospheric pressure ion sources // Mass Spectrometry Reviews. 2009. Vol. 28. No. 6. Pp. 870–897.
4. Willoughby R. C., Sheehan E. W., Fries D. Transmission of ions through laminated conductance pathways from atmospheric pressure. Режим доступа: [http://www.lcms.com/products/pdf/ion\\_conductane\\_asms\\_2004\\_abstract.pdf](http://www.lcms.com/products/pdf/ion_conductane_asms_2004_abstract.pdf) (Дата обращения: 01.12.2022).
5. Sheehan E. W., Willoughby R. C. Apparatus and method for focusing ions and charged particles at atmospheric pressure. United State Patent No. 6744041B2 (2004).
6. Андреева А. Д., Мурадымов М. З., Курнин И. В., Галль Л. Н. Электростатическая фокусировка ионов в газодинамических интерфейсах масс-спектрометров // Аналитическое приборостроение. 2006. Т. 16. № 3. С. 80–87.
7. Кузьмин Д. А., Мурадымов М. З., Краснов Н. В., Помозов Т. В., Арсеньев А. Н. Транспортировка ионов в источниках с ионизацией при атмосферном давлении. I. Субстантивная геометрия // Научное приборостроение. 2017. Т. 27. № 4. С. 8–16.
8. Arseniev A. N., Kurnin I. V., Krasnov N. V., Muradymov M. Z., Yavor M. I., Pomozov T. V., Krasnov M. N. Optimization of ion transport from atmospheric pressure ion sources // International Journal for Ion Mobility Spectrometry. 2019. Vol. 22. No. 1. Pp. 31–38.
9. Помозов Т. В., Краснов Н. В. Влияние особенностей электрического поля в системе диафрагм на транспортировку потока заряженных частиц при атмосферном давлении // Научное приборостроение. 2021. Т. 31. № 3. С. 3–9.
10. Manura D. J., Dahl D. A. SIMION™ 8.0 User Manual. Sci. Instrument Services, Inc., Idaho Nat. Lab., 2006.
11. Appelhans A. D., Dahl D. A. SIMION ion optics simulations at atmospheric pressure // International Journal of Mass Spectrometry. 2005. Vol. 244. No. 1. Pp. 1–14.

### REFERENCES

1. Gall L. N., Bazenov A. N., Shkurov V. A., et al., ERIAD (ESI) mass spectrometry as a new method of isotopic and elemental analysis, Mass-Spectrometriya. 4 (1) (2007) 11–18 (in Russian).
2. Lebedev A. T., Mass spectrometriya v organicheskoy khimii [Mass spectrometry in organic chemistry], Publishing House BINOM, Knowledge Laboratory, Moscow, 2003 (in Russian).
3. Covey T. R., Thomson B. A., Schneider B. B., Atmospheric pressure ion sources, Mass Spectrom. Rev. 28 (6) (2009) 870–897.
4. Willoughby R. C., Sheehan E. W., Fries D., Transmission of ions through laminated conductance pathways from atmospheric pressure, [lcms.com/products/pdf/ion\\_conductane\\_asms\\_2004\\_abstract.pdf](http://www.lcms.com/products/pdf/ion_conductane_asms_2004_abstract.pdf). Accessed December 01, 2022.
5. Sheehan E. W., Willoughby R. C., Apparatus and method for focusing ions and charged particles at atmospheric pressure, United State Patent, No. 6744041B2 (2004).
6. Andreyeva A. D., Muradymov M. Z., Kurnin I. V., Gall L. N., An electrostatic focusing effect in the gas dynamical interface of the mass spectrometer, Nauchnoye Priborostroeniye. 16 (3) (2006) 80–87 (in Russian).
7. Kuzmin D. A., Muradymov M. Z., Krasnov N. V., et al., Transport of ions in sources with ionization at atmospheric pressure. I. Substantive geometry, Nauchnoye Priborostroeniye. 27 (4) (2017) 8–16 (in Russian).



8. Arseniev A. N., Kurnin I. V., Krasnov N. V., et al., Optimization of ion transport from atmospheric pressure ion sources, *Int. J. Ion Mobil. Spectrom.* 22 (1) (2019) 31–38.

9. Pomozov T. V., Krasnov N. V., Influence of features of the electric field in the diaphragm system on the transportation of the flow of charged particles at atmospheric pressure, *Nauchnoye Priborostroeniye.* 31 (3) (2021) 3–9 (in Russian).

10. Manura D. J., Dahl D. A., SIMIONTM 8.0 User Manual, Sci. Instrument Services, Inc., Idaho Nat. Lab., 2006.

11. Appelhans A. D., Dahl D. A., SIMION ion optics simulations at atmospheric pressure, *Int. J. Mass Spectrom.* 244 (1) (2005) 1–14.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ПОМОЗОВ Тимофей Вячеславович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института аналитического приборостроения Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия.

198095, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 31–33

tim-kor@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8925-7600

**МУРАДЫМОВ Марат Зарифович** – старший научный сотрудник Института аналитического приборостроения Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия.

198095, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 31–33

m.muradymov@gmail.com

ORCID: 0000-0002-7969-496X

**ТКАЧ Егор Андреевич** – аспирант Института аналитического приборостроения Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия.

198095, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 31–33

egorka765@gmail.com

ORCID: 0009-0003-8001-7469

#### THE AUTHORS

**POMOZOV Timofey V.**

*Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences*

31–33, Ivan Chernykh St., St. Petersburg, 198095, Russia

tim-kor@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8925-7600

**MURADYMOV Marat Z.**

*Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences*

31–33, Ivan Chernykh St., St. Petersburg, 198095, Russia

m.muradymov@gmail.com

ORCID: 0000-0002-7969-496X

**TKACH Egor A.**

*Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences*

31–33, Ivan Chernykh St., St. Petersburg, 198095, Russia

egorka765@gmail.com

ORCID: 0009-0003-8001-7469

*Статья поступила в редакцию 21.12.2022. Одобрена после рецензирования 09.02.2023. Принята 09.02.2023.*

*Received 21.12.2022. Approved after reviewing 09.02.2023. Accepted 09.02.2023.*