

Физическая электроника

Научная статья

УДК 621.384.8

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17410>

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОКУСИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ИОННОГО ТОКА В СИСТЕМУ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ОТКАЧКИ МАСС-СПЕКТРОМЕТРА

Т. В. Помозов [✉], **М. З. Мурадымов**, **Е. А. Ткач**, **М. И. Явор**

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, Россия

[✉] tim-kor@mail.ru

Аннотация. Проведено экспериментальное исследование транспортировки заряженных частиц в ионном источнике с коронным разрядом и фокусирующей системой, состоящей из тонких диафрагм, с учетом газодинамического течения в окрестности сопла. Показано, что область влияния газодинамического течения на транспортировку ионов в окрестности сопла не превышает двух диаметров сопла. Представлены результаты сравнения эффективности транспортировки ионного пучка в ионном источнике с фокусирующей системой и без нее. Использование фокусирующей системы позволяет втрое увеличить ток на коллекторе и на порядок величины повысить сумму токов, приходящих на сопло и коллектор.

Ключевые слова: ионный источник, масс-спектрометр, система дифференциальной откачки, фокусирующая система, транспортировка ионов

Для цитирования: Помозов Т. В., Мурадымов М. З., Ткач Е. А., Явор М. И. Эффективность фокусирующей системы при транспортировке ионного тока в систему дифференциальной откачки масс-спектрометра // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2024. Т. 17. № 4. С. 114–120. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17410>

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.17410>

THE EFFICIENCY OF A FOCUSING SYSTEM WHEN ION CURRENT TRANSPORTING TO THE DIFFERENTIAL PUMPING SYSTEM OF A MASS SPECTROMETER

T. V. Pomozov [✉], **M. Z. Muradymov**, **E. A. Tkach**, **M. I. Yavor**

Institute for Analytical Instrumentation RAS, St. Petersburg, Russia

[✉] tim-kor@mail.ru

Abstract. In this work, a charge particle beam transport in a corona discharge ion source with a thin diaphragm focusing system taking into account the gas-dynamic flow in the vicinity of the nozzle has been studied experimentally. The space of influence of the gas-dynamic flow on the ion transport in the vicinity of the nozzle was shown not to exceed two nozzle diameters. 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. Using the focusing system allowed one to triple the current entering the collector and to raise the sum of currents entering the nozzle and collector by an order of magnitude.

Keywords: ion source, mass spectrometer, differential pumping system, focusing system, ion transport



For citation: Pomozov T. V., Muradymov M. Z., Tkach E. A., Yavor M. I., The efficiency of a focusing system when ion current transporting to the differential pumping system of a mass spectrometer, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 17 (4) (2024) 114–120. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17410>

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

Введение

Источники ионов с ионизацией при атмосферном давлении давно используются в различных типах масс-спектрометров при решении широкого круга задач в самых разнообразных областях исследования вещества: протеомике, биоорганической химии, экологии, криминалистике и др. [1 – 3]. Главный общий недостаток таких источников – это существенные (два порядка и более от общего тока источника) потери трансмиссии ионного пучка при транспортировке из области ионизации с атмосферным давлением через сопло в первую ступень системы дифференциальной откачки (СДО) газодинамического интерфейса масс-спектрометра [4]. Предпринимаемые к настоящему времени попытки увеличения трансмиссии ионного пучка указывают на необходимость осуществления электростатической фокусировки ионов на сопло [5 – 9].

В работе [10] нами была исследована численно и экспериментально перспективная фокусирующая система из тонких диафрагм [11] в источнике ионов с коронным разрядом в стоячем газе; система продемонстрировала свою высокую эффективность и правильность подхода к выбору ее геометрии. Однако на транспортировку ионов в реальных ионных источниках с ионизацией при атмосферном давлении оказывает воздействие не только электростатическое поле, но и газодинамическое течение нейтрального газа в окрестности сопла (сток газа в сопло).

Поскольку численный расчет динамики движения ионов при таких условиях весьма затруднителен, цель данного экспериментального исследования – оценить эффективность транспортировки ионного пучка в источнике с фокусировкой в первую ступень СДО масс-спектрометра в присутствии газодинамического течения в окрестности сопла.

Экспериментальная установка и средства измерения

Схема компактной экспериментальной установки для исследования транспортировки ионного тока из источника ионов с фокусирующей системой через сопло в первую ступень СДО показана на рис. 1.

Ионный источник с положительным коронным разрядом и фокусирующая система, состоящие из коронирующего острия *б* и набора изолированных друг от друга четырех тонких диафрагм *1–4*, детально описаны в наших работах [10, 11]. За четвертой диафрагмой с наименьшим диаметром отверстия, сформирована зона откачки, имитирующая первую ступень СДО газодинамического интерфейса. Таким образом, эта диафрагма представляет собой сопло, через которое осуществляется натекание газа из области атмосферного давления в область форвакуума. В вакуумной камере *δ* для измерения тока, проходящего за сопло, установлен коллектор *9*, выполненный в виде цилиндрического электрода толщиной 1,5 мм. Все электроды установки (кроме заземленного сопла) подключены к высокостабильным высоковольтным регулируемым блокам питания *26–30* и электрометрам *14–19*, регистрирующим токи, протекающие по электродам. Вакуумная камера *δ* откачивается масляным форвакуумным насосом *13* и оснащена устройствами контроля давления остаточного газа *11* и регулировки скорости откачки *12*. В конструкции экспериментальной установки предусмотрена возможность изменять расстояние от коронирующего острия *б* до противоиэлектрода *1* (первой диафрагмы фокусирующей системы) и положение коллектора *9* внутри зоны откачки.

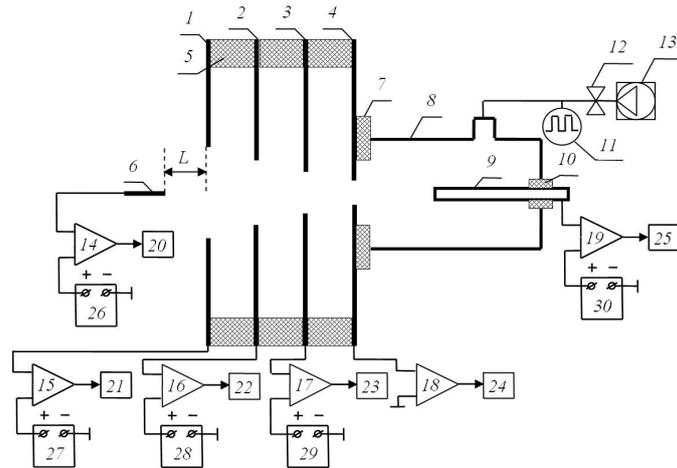


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки:

1 – 4 – тонкие диафрагмы, 5 – керамические вставки, 6 – коронирующее острие, 7 – изолятор, 8 – вакуумная камера, 9 – коллектор (медный стержень), 10 – вильсоновское уплотнение, 11 – датчик вакуумного давления, 12 – вентиль, 13 – форвакуумный насос, 14–19 – электрометры, 20–25 – цифровые измерители токов, 26–30 – высокостабильные высоковольтные блоки питания.

Толщина тонких диафрагм составляет 0,1 мм, керамических вставок – 1 мм

Результаты и обсуждение

Эффективность транспортировки ионного пучка в первую ступень СДО в рассматриваемом ионном источнике с фокусировкой определяется прежде всего величинами токов, регистрируемых на коллекторе I_c и сопле I_4 . Кроме того, основные тенденции в перераспределении токов на электродах системы в зависимости от разности потенциалов между диафрагмами фокусирующей системы ΔU , расстояния L от коронирующего острия до противоэлектроды и тока коронного разряда I_p в целом аналогичны таковым для рассматриваемой ранее системы в отсутствие газодинамического течения в окрестности сопла [10]. Поэтому ниже будут рассматриваться экспериментальные зависимости токов на коллекторе и сопле от давления в зоне откачки при следующих условиях:

ток коронного разряда $I_p = 1$ мкА,

расстояние от коронирующего острия до противоэлектроды $L = 7$ мм,

разность потенциалов между диафрагмами фокусирующей системы

ΔU варьировалось от -300 до -900 В,

давление p в вакуумной камере варьировалось от 750 до 9 Торр,

расстояние от сопла до коллектора – 10 мм,

потенциал коллектора $U_c = -300$ В.

На рис. 2 представлены зависимости тока на коллекторе I_c , сопле I_4 и суммы токов $I_4 + I_c$ от давления в зоне откачки при разных значениях разности потенциалов ΔU между электродами фокусирующей системы. Повышение разности потенциалов ΔU с -300 до -900 В сопровождается ростом регистрируемого тока на коллекторе I_c примерно в 1,5 раза (это составляет около 6,7 % от общего тока коронного разряда) и ростом тока на сопле I_4 примерно в 3,4 раза при давлении в вакуумной камере 9 Торр вследствие усиления фокусирующих свойств системы.

Анализ распределений токов, приходящих на электроды, показывает, что токи, регистрируемые на первых трех диафрагмах фокусирующей системы, практически не зависят от давления в зоне откачки. Отсюда можно заключить, что область влияния газодинамического течения (стока в сопло) не превышает диаметра отверстия в третьей диафрагме (1,2 мм) при диаметре сопла 0,5 мм. Таким образом, протяженность области влияния газодинамического течения можно оценить как два диаметра сопла.

Снижение давления за соплом сопровождается повышением массового расхода воздуха. Увеличение этого расхода ограничено достижением скорости звука в критическом сечении сопла, которое происходит при давлении около 230 Торр, когда сумма токов на сопле и коллекторе $I_4 + I_c$ становится практически неизменной (см. рис. 2).

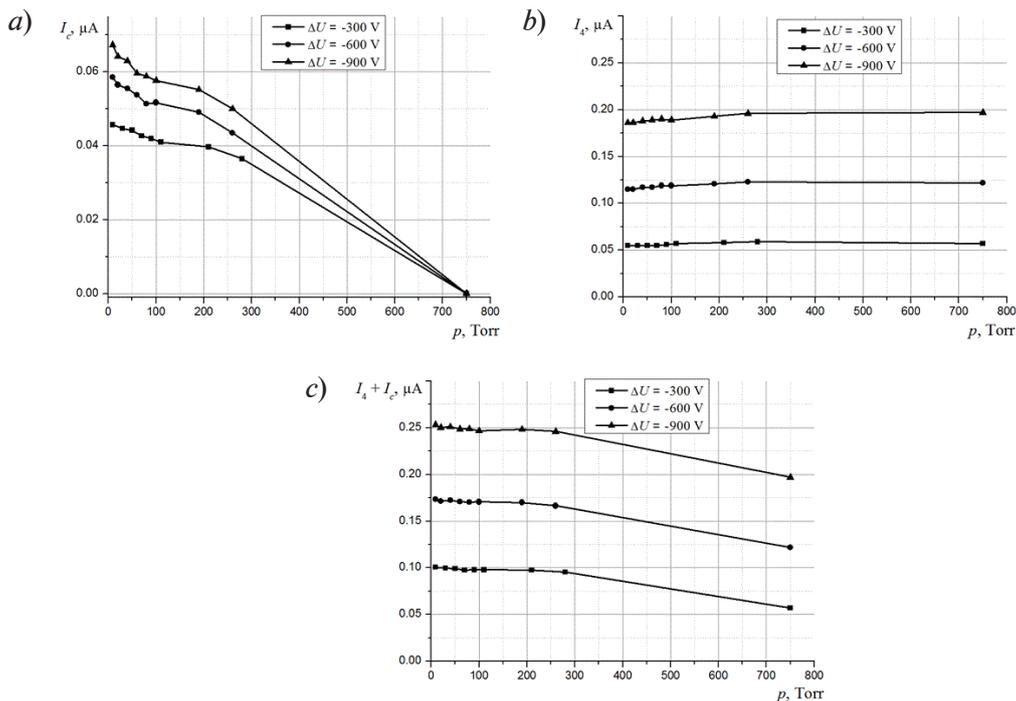


Рис. 2. Токовые характеристики ионного источника с фокусирующей системой: зависимости токов I_c , приходящих на коллектор (а), I_4 , приходящих на сопло (б), и суммы $I_4 + I_c$ (с) от давления в вакуумной камере для разных значений разности потенциалов ΔU между диафрагмами

Целесообразность использования фокусирующей системы с тонкими диафрагмами можно оценить, если сравнить эффективности транспортировки ионного пучка в первую ступень СДО в источнике ионов с фокусирующей системой и в ее отсутствие; в последнем случае достаточно заменить широкие изоляторы между диафрагмами в рассматриваемой схеме (см. рис. 1) на тонкие фторопластовые прокладки толщиной 0,1 мм. В этом случае исходная система из тонких диафрагм преобразуется в заземленный квазиплоский противозлектрод.

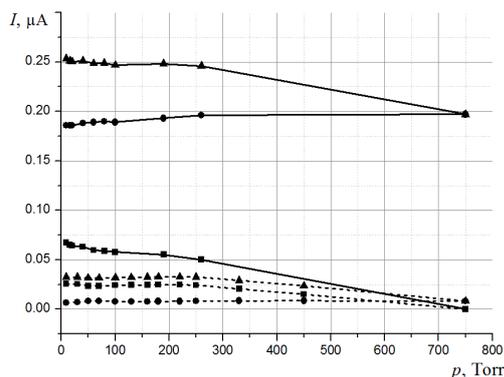
Сравнение зависимостей токов, регистрируемых на коллекторе (I_c), сопле (I_4), и суммы токов $I_4 + I_c$ от давления в вакуумной камере в источнике ионов с фокусировкой при $\Delta U = -900\text{ В}$ и в схеме с квазиплоским противозлектродом представлено на рис. 3.

Полученные экспериментальные результаты демонстрируют трехкратный рост тока на коллекторе I_c и увеличение почти на порядок (приблизительно в 8 раз) суммы токов $I_4 + I_c$, регистрируемых на сопле и коллекторе при использовании фокусирующей системы при заданных условиях эксперимента.

Влияние газодинамического течения в окрестности сопла на транспортировку ионного пучка можно оценить, если сравнить приведенные в таблице значения приходящих на сопло и коллектор токов в источнике ионов с фокусирующей системой в стоячем газе и с откачкой.

Из представленных данных видно, что газодинамическое течение, несмотря на ограниченную пространственную область воздействия, существенно повышает эффективность транспортировки ионов за сопло и сопровождается ростом тока на коллекторе I_c примерно в 4,5 раза и увеличением суммы токов $I_4 + I_c$ в 2,5 раза. Практически аналогичное увеличение токов на сопле и коллекторе экспериментально наблюдается и в схеме источника ионов без фокусировки с откачкой.

Таблица



Сравнение значений токов на коллекторе и суммы токов, приходящих на сопло и коллектор в ионном источнике, при разных условиях эксперимента

Обозначение тока в ионном источнике	Значение тока, нА		I_2 / I_1
	I_1	I_2	
I_c	15	67	4,47
$I_4 + I_c$	100	253	2,53

Рис. 3. Сравнение зависимостей от давления токов I_c , приходящих на коллектор (■), I_4 , приходящих на сопло (●), и суммы $I_4 + I_c$ (▲) в ионном источнике с фокусировкой ($\Delta U = -900$ В, сплошные линии) и без нее (пунктиры)

Обозначения: I_c – ток на коллекторе; I_4 – ток, приходящий на сопло; I_1 – токи, протекающие в ионном источнике с фокусировкой в стоячем газе; I_2 – токи там же, но при откачке газа за соплом. Остальные условия эксперимента: $I_p = 1$ мкА, $L = 7$ мм, $\Delta U = -900$ В.

Заключение

В настоящей работе экспериментально исследована эффективность транспортировки ионного пучка в первую ступень СДО с использованием фокусирующей системы на основе тонких диафрагм в источнике с коронным разрядом с учетом как электростатической фокусировки ионов, так и газодинамических эффектов в окрестности сопла. Область влияния газодинамического течения (стока в сопло) на перераспределение ионного тока не превышала двух диаметров сопла. Тем не менее, газодинамическое течение существенно повышает эффективность транспортировки ионного пучка за сопло.

Полученные результаты могут служить основой для дальнейшего совершенствования конструкции источников ионов с ионизацией при атмосферном давлении с целью увеличения чувствительности масс-спектрометра.

Поскольку электростатическая фокусировка ионного пучка сопровождается ростом почти на порядок величины тока, регистрируемого на сопле, одной из перспективных модификаций рассмотренной ионно-оптической схемы источника представляется увеличение диаметра сопла, с организацией дополнительной области дифференциальной откачки. Это направление и планируется как естественное продолжение наших исследований.

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_conductance_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 // Научное 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. Кузьмин Д. А., Мурадымов М. З., Краснов Н. В., Помозов Т. В., Арсеньев А. Н., Краснов М. Н. Транспортировка ионов в источниках с ионизацией при атмосферном давлении. II. Инверсная геометрия // Научное приборостроение. 2017. Т. 27. № 4. С. 17–23.
9. 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.
10. 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.
11. 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.

REFERENCES

1. Gall L. N., Bazhenov A. N., Shkurov V. A., et al., ERIAD (ESI) mass spectrometry as a new method of isotopic and elemental analysis, Mass-Spektrometriya [Mass Spectrometry]. 4 (1) (2007) 11–18 (in Russian).
2. Lebedev A. T., Mass-spektrometriya 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, http://www.lcms.com/products/pdf/ion_conductance_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, Nauchnoe Priborostroenie [Scientific Instrumentation]. 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, Nauchnoe Priborostroenie [Scientific Instrumentation]. 27 (4) (2017) 8–16 (in Russian).
8. Kuzmin D. A., Muradymov M. Z., Krasnov N. V., et al., Transport of ions in sources with ionization at atmospheric pressure. II. Inverse geometry, Nauchnoe Priborostroenie [Scientific Instrumentation]. 27 (4) (2017) 17–23 (in Russian).
9. 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.
10. 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 Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 16 (2) (2023) 52–60 (in Russian).
11. 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, Nauchnoe Priborostroenie [Scientific Instrumentation]. 31 (3) (2021) 3–9 (in Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПОМОЗОВ Тимофей Вячеславович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией медицинской масс-спектрометрии Института аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, Россия.

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

tim-kor@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8925-7600

МУРАДЫМОВ Марат Зарифович – старший научный сотрудник лаборатории медицинской масс-спектрометрии Института аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, Россия.

198095, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 31-33, лит. А.
m.muradymov@gmail.com
ORCID: 0000-0002-7969-496X

ТКАЧ Егор Андреевич – аспирант Института аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, Россия.

198095, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 31-33, лит. А.
egorka765@gmail.com
ORCID: 0009-0003-8001-7469

ЯВОР Михаил Игоревич – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории оптики заряженных частиц и математического моделирования Института аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, Россия.

198095, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 31-33, лит. А.
mikhail.yavor@gmail.com
ORCID: 0000-0002-0547-987X

THE AUTHORS

POMOZOV Timofey V.

Institute for Analytical Instrumentation, RAS
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, RAS
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, RAS
31-33, Ivan Chernykh St., St. Petersburg, 198095, Russia
egorka765@gmail.com
ORCID: 0009-0003-8001-7469

YAVOR Mikhail I.

Institute for Analytical Instrumentation RAS
31-33, Ivan Chernykh St., St. Petersburg, 198095, Russia
mikhail.yavor@gmail.com
ORCID: 0000-0002-0547-987X

Статья поступила в редакцию 10.05.2024. Одобрена после рецензирования 01.07.2024. Принята 01.07.2024.

Received 10.05.2024. Approved after reviewing 01.07.2024. Accepted 01.07.2024.