

УДК 621.384.8

© И. В. Курнин, Н. В. Краснов, А. Г. Черепанов,
А. Н. Арсеньев, М. Н. Краснов, Е. П. Подольская, 2021

ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕССЕТОЧНОГО ДВУХЭЛЕКТРОДНОГО ИОННОГО ЗАТВОРА ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

В качестве ионного затвора для формирования короткого ионного импульса в ион-дрейфовом спектрометре предложена бессеточная двухдиафрагменная конструкция. Экспериментально показано, что в зависимости от геометрических и электрических параметров затвора существуют оптимальные длительность электрического импульса (открытия затвора) и напряженность электрического поля в системе электростатической транспортировки, которые обеспечивают максимальную амплитуду ионного импульса.

Кл. сл.: источник ионов, электрический затвор, транспортировка ионов при атмосферном давлении

ВВЕДЕНИЕ

Важным элементом в спектрометре ионной подвижности является ионный затвор, расположенный между источником непрерывного потока заряженных частиц и входом в дрейфовую трубку и предназначенный для формирования ионного пакета в области дрейфа с последующей сепарацией ионов по подвижности. Форма ионного пакета и его амплитуда характеризуют разрешающую способность и чувствительность спектрометра подвижности. В настоящее время для формирования и инъекции ионного пакета применяются сеточные ионные затворы Бредбери – Нильсена [1], Тиндаля – Пауэлла [2], трехсеточный ионный затвор [3]. В работе [4] отмечено, что эти ионные затворы обладают в той или иной мере дискриминацией ионной подвижности. Это ухудшает разрешающую способность спектрометров ионной подвижности. К существенным недостаткам сеточных ионных затворов следует отнести их малую геометрическую прозрачность для ионного пучка, порядка 60%, что вносит свой вклад в падению чувствительности; также рассеяние ионов на сетках приводит к уширению ионного пакета и, как следствие, ухудшению разрешающей способности. Также к недостаткам сеточных ионных затворов можно отнести технологическую сложность их изготовления, обрыв нитей и замыкание соседних нитей с противоположными потенциалами, что приводит к неработоспособности затвора. Диаметр апертуры применяемых ионных затворов, как правило, составляет 2–2.5 см. Для формирования структуры электрического поля затвора, позволяющей с минимальными искаже-

ниями сформировать пакет ионов с резкими границами (фронтами), при таких размерах используются сетки различной конструкции: параллельные проводящие нити малого диаметра (50 мкм) с интервалом от 0.2 до 1 мм [5, 6] или апертуры в виде "ситечка" [7]. Альтернативой "сеточным" затворам могут являться бессеточные двухдиафрагменные затворы с малым диаметром апертуры порядка 2 мм. Такие диаметры апертуры позволяют создать необходимую структуру электрического поля в затворе, который формирует ионные пакеты не хуже сеточных затворов, но при этом обладает большей прозрачностью и простотой конструкции. Непрерывные ионные пучки диаметром 2 мм можно получить, используя либо ионную воронку [6], содержащую огромное количество (десятки) электродов с переменным диаметром апертуры от 20 мм до 2 мм, применяемую при давлениях в области дрейфа порядка 1 Торр с использованием постоянного напряжения и высокочастотного напряжения, либо систему транспортировки при атмосферном давлении [8], состоящую из трех-четырех электродов с переменными апертурами от 4 мм до 1.2 мм и работающую при атмосферном давлении при постоянных напряжениях на электродах.

В данной работе предлагается новая конструкция бессеточного ионного затвора, состоящая из двух диафрагм, и представляются экспериментальные результаты его работы по преобразованию непрерывного ионного потока в импульсные ионные пакеты при атмосферном давлении, сравнение полученных результатов с характеристиками "сеточных" затворов.

БЕССЕТОЧНЫЙ ДВУХДИАФРАГМЕННЫЙ ИОННЫЙ ЗАТВОР. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Предлагаемый бессеточный ионный затвор предназначен для преобразования непрерывного ионного пучка в последовательность пакетов заряженных частиц поступающих в анализатор с заданными частотой и длительностью, и представляет собой пару изолированных проводящих параллельных диафрагм с соосными отверстиями. Одна из диафрагм находится под регулируемыми напряжениями от независимого источника питания, а другая диафрагма электрически соединена с независимым импульсным источником питания с регулируемой длительностью, частотой и амплитудой напряжения. Суперпозиция электрических полей в двухэлектродном затворе в режимах закрытого и открытого затвора представлена соответственно на рис. 1 и рис. 2. В случае закрытого затвора ионы теряются на первой диафрагме, т.к. потенциал второй диафрагмы выше потенциала первой. При понижении потенциала второй диафрагмы относительно первой ионы проходят в дрейфовую область ион-дрейфового спектрометра. Импульсное понижение этого потенциала формирует короткий ионный импульс. Кроме того, вследствие такого устройства затвора задний фронт формируемого ионного импульса поджимается, т.к. при закрытии ионы выталкиваются из области неоднородного электрического поля, тогда как в случае затвора Бредбери – Нильсена это

делалось специальным образом [9]. Предлагаемый бессеточный ионный затвор отличается простотой конструкции и легко может быть использован в нашем ион-дрейфовом спектрометре [10].

Моделирование бессеточного двухдиафрагменного затвора с целью определения его характеристик и режимов работы, обеспечивающих на выходе короткий ионный импульс (пакет) с максимально возможной амплитудой, проводилось в пакете SIMION 7 [11]. Для расчета движения ионов в газе при атмосферном давлении в сильных электрических полях использовалась разработанная ранее модель [12], реализованная в prg-программе [13]. В программе учитывается диффузия иона в плотном газе и с учетом коэффициента подвижности его движение в электрическом поле.

Был рассмотрен затвор с диафрагменными пластинами толщиной 0.2 мм и расстоянием между ними 0.2 мм, диаметром отверстий обеих диафрагм 2 мм. С целью определения параметров выходного ионного импульса при моделировании варьировалась длительность открытия затвора $dt = 20\text{--}50$ мкс. На рис. 3 приведены временные профили ионных импульсов для амплитуды открывающего импульса -100 В и фиксированного коэффициента подвижности $K_0 = 3$ см²/(В·с). Видно, что существует оптимальная длительность открытия затвора, которой отвечает узкий выходной ионный пик достаточной амплитуды. Для моделируемых условий величина оптимальной длительности открытия затвора составляет $dt = 30$ мкс, профиль 2 на рис. 3. При этом ионный пик,

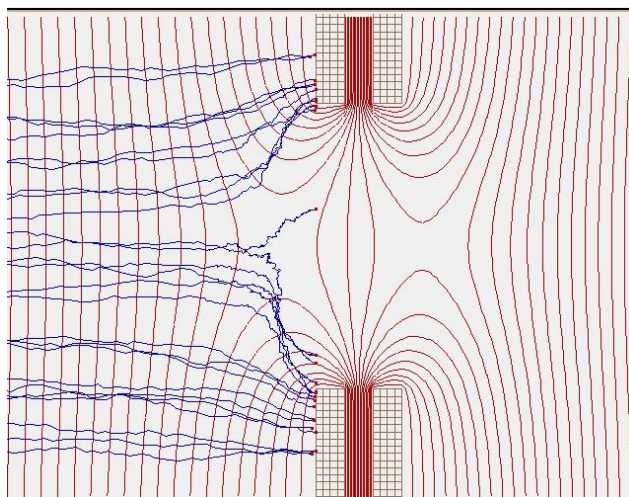


Рис. 1. Пространственное распределение потенциала в случае закрытого бессеточного двухдиафрагменного затвора. Показаны ионные траектории

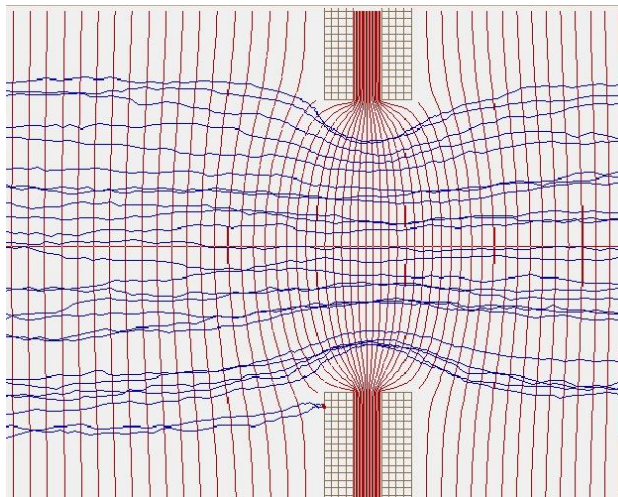


Рис. 2. Пространственное распределение потенциала в случае открытого бессеточного двухдиафрагменного затвора. Показаны ионные траектории

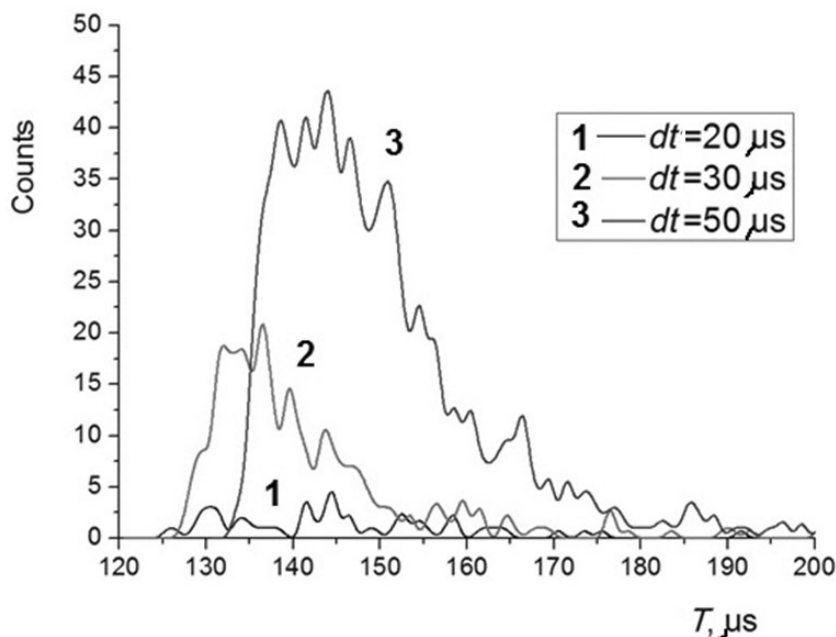


Рис. 3. Модельные временные профили ионных импульсов в зависимости от длительности открытия затвора

формируемый ионами с меньшей длительностью открытия (профиль 1, 20 мкс), оказывается значительно меньшим по амплитуде, а соответствующее значение длительности ионного пика увеличивается в несколько раз. Профили 2 (30 мкс) и 3 (50 мкс) не симметричны, кроме того, профиль 3 сильно затянут в сторону больших времен по длительности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для экспериментального изучения характеристик бессеточного двухдиафрагменного электрического затвора, работающего при атмосферном давлении в покое газе (лабораторном воздухе) при нормальных условиях и влияющего на преобразование непрерывного пучка ионов в последовательность ионных пакетов, была создана простая по конструкции и малогабаритная экспериментальная установка. Конструкция установки представлена на рис. 4.

На рис. 5 представлена схема экспериментальной установки. Далее в тексте все ссылки к элементам экспериментальной установки номерами позиций даны по рис. 5. Для простоты эксперимента в качестве эмитирующей заряженные частицы поверхности использовали острие (игла) (1) с положительным коронным разрядом. На расстоянии 5 мм от иглы соосно располагался анод в виде тонкостенной диафрагмы (2), являющейся первым электродом системы транспортировки заряженных частиц, которая включает в себя еще две тонкостенные диафрагмы (3) и (4). Диафрагмы (2), (3), (4) имеют толщину 0.2 мм и находятся на расстоянии 1 мм друг от друга, диаметры отвер-

стий в диафрагмах (2), (3) и (4) — 4, 2.5 и 2.5 мм соответственно. За диафрагмой (4) на расстоянии 3 мм расположен бессеточный электрический затвор, формирующий ионный импульс и представляющий собой сборку из двух тонкостенных диафрагм (5) и (6) толщиной 0.2 мм с центральными отверстиями диаметром 2 мм и находящимися

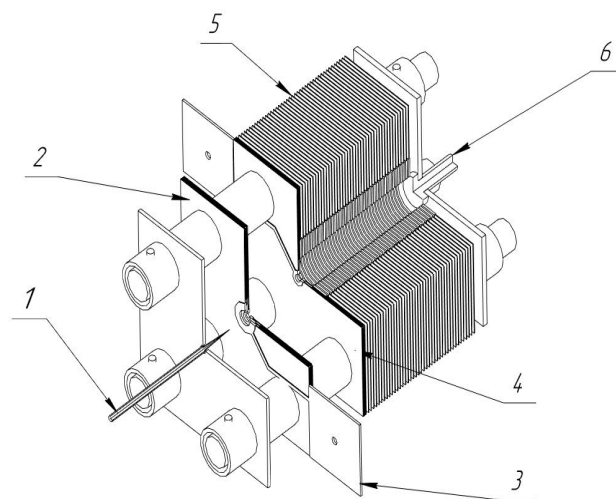


Рис. 4. Конструкция экспериментальной установки для исследования характеристик бессеточного двухэлектродного затвора.

1 — коронирующее острие, 2 — противозлектрод, 3 — двухэлектродная система транспортировки непрерывного ионного пучка до 1-го электрода затвора, 4 — двухэлектродный бессеточный затвор, 5 — система электростатической транспортировки ионных пакетов (пиков) к коллектору, 6 — коллектор

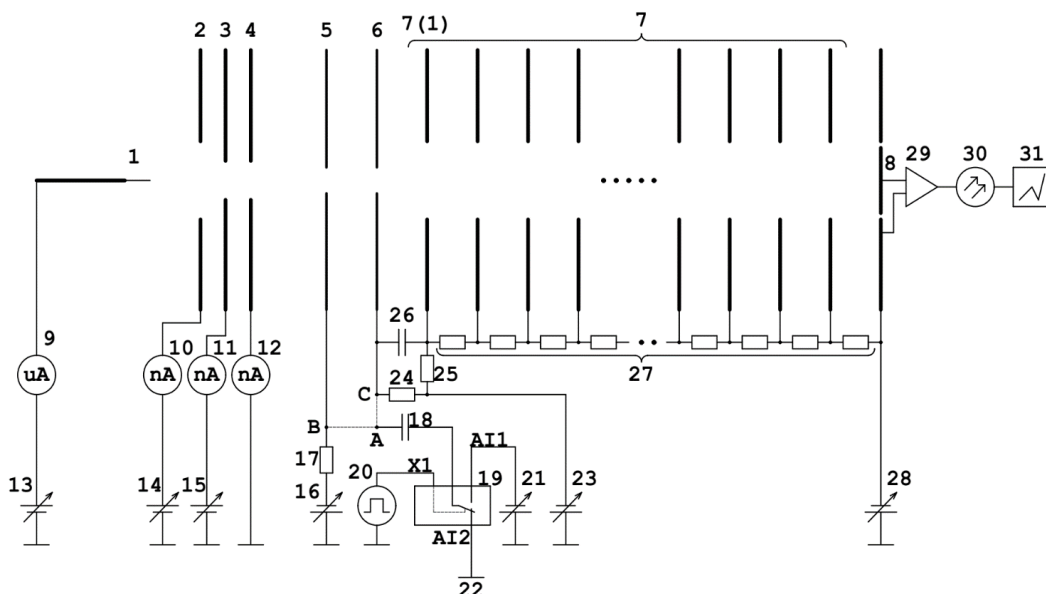


Рис. 5. Схема экспериментальной установки.

1 — коронирующее острие; 2 — анод в виде тонкостенной диафрагмы; 3, 4 — две тонкостенные диафрагмы; 5, 6 — диафрагмы бессеточного электрического затвора; 7 — система электростатической транспортировки ионных пакетов (пиков); 8 — коллектор; 9, 10, 11, 12 — цифровые измерители тока; 13, 14, 15, 16, 21, 23, 28 — высоковольтные управляемые высокостабильные блоки питания; 17, 24, 25, 27 — резисторы; 18, 26 — конденсаторы; 19 — коммутатор; 20 — генератор импульсов; 22 — заземление; 29 — усилитель; 30 — оптоэлектронная развязка; 31 — двухканальный осциллограф

на расстоянии 2 мм друг от друга. Далее на расстоянии 1 мм от второй диафрагмы затвора (6) располагается система электростатической транспортировки ионных пакетов (пиков) (7), состоящая из набора последовательно расположенных диафрагм с внутренним диаметром 10 мм на расстоянии 2 мм друг от друга, общая длина системы 60 мм. Через 2 мм после последнего электрода системы (7) находится коллектор (8) в виде плоского круга диаметром 8 мм. На электроды (1), (2), (3), (4) поступают регулируемые высоковольтные напряжения от соответствующих каналов питания, каждый из которых включает в себя цифровой измеритель тока Digital Multimeter UT33C+UNIT (9),(10),(11),(12), высоковольтный управляемый высокостабильный блок питания Applied Kilovolts (13–15) соответственно с необходимыми диапазонами регулировки и полярностью, второй полюс которых находится под потенциалом "земля". На первый электрод затвора (5) всегда подается постоянное регулируемое напряжение от высоковольтного высокостабильного источника Applied Kilovolts (16) номиналом 2.5 кВ через резистор (17). На этот же электрод в режиме

I работы затвора через разделительный конденсатор 0.1 мкФ, 3 кВ (18) по цепи АВ поступает прямоугольный импульс напряжения с регулируемой амплитудой и длительностью от коммутатора (19), который в свою очередь по логическому входу X1 подключен к генератору импульсов TGP 110 10 Mhz Pulse Generator (England) (20), а по первому аналоговому входу (AI1) к высокостабильному источнику Applied Kilovolts (21) номиналом 0.5 кВ, а по второму аналоговому входу (AI2) подключен к земле (22). На второй электрод затвора (6) и первый электрод системы электростатической транспортировки ионных пакетов 7(1) всегда поступает постоянное регулируемое высоковольтное напряжение от высокостабильного высоковольтного источника Applied Kilovolts (23) номиналом 2.5 кВ через резисторы (24) и (25). Между электродами (6) и (7) расположен блокировочный конденсатор (26). В режиме II работы затвора на электрод (6) по цепи АС поступает прямоугольный импульс напряжения с регулируемой амплитудой и длительностью от коммутатора (19). На электроды системы электростатической транспортировки ионных пакетов (7) всегда

поступают постоянные регулируемые напряжения от резистивного делителя (27), который с одной стороны подключен к высокостабильному высоковольтному регулируемому источнику Applied Kilovolts (23), а с другой к высокостабильному высоковольтному регулируемому источнику Applied Kilovolts (28), второй полюс которого находится под потенциалом "земля". Кроме того, под потенциалом источника высокого напряжения (28) находятся коллектор (8) и усилитель (29). Сигнал с коллектора (8) поступает на усилитель (29) и через оптронную развязку (30) на вход двухканального осциллографа Tektronix DPO 3032 (31). Электрический прямоугольный управляющий импульс, подаваемый на затвор, имеет следующие характеристики: длительность импульса может изменяться в диапазоне от 10 мкс до 8 мс, амплитуда может изменяться в диапазоне от 100 В до 1000 В, длительность фронтов импульса 100 нс.

Питание высоковольтных источников осуществлялось от импульсного блока питания Mean Well S-240-24, подключенного к сети ~ 220 В, потребляемая мощность — до 240 Вт, выходное напряжение — 24 В, ток нагрузки — до 10 А, с защитой от перегрузок, короткого замыкания и выбросов питающего напряжения.

Электроды аналитической части экспериментальной установки были выполнены по технологии печатных плат (PCB) [7]. На электродах у отверстий имеется двухсторонний металлический проводящий слой в виде кольца шириной 1 мм, который также покрывает внутренний край отверстия в электроде (рис. 6). Диэлектрические прокладки выполнены из материала электродов, но без покрытия металлом. Внутренние диаметры в диэлектрических прокладках 10 мм, что позволяет избежать зарядки диэлектрика.

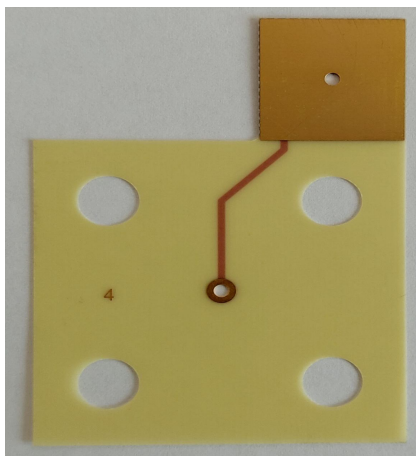


Рис. 6. Фотография диафрагмы затвора с внутренним диаметром 2 мм

Изучение работы бессеточного диафрагменного затвора в зависимости от величины задаваемых на электроды потенциалов проводилось по следующей методике. Во всех экспериментах ток положительного коронного разряда на игле устанавливался приблизительно на уровнях 0.5, 1 мкА. Величина напряжений, подаваемых на электроды (2), (3), (4), подбиралась таким образом, чтобы на электроды системы транспортировки попадал минимум ионного тока.

Система игла (1) – анод (2) позволила в описываемых экспериментах получить независимый, относительно стабильный источник заряженных частиц при атмосферном давлении. Напряжения, подаваемые на другие электроды системы, либо не влияли, либо влияли очень слабо на величину тока коронного разряда и не искажали качественного характера результатов.

ЭКСПЕРИМЕНТ

При экспериментальном изучении характеристик бессеточного двухэлектродного электрического затвора на электроды (1–4) подавались следующие напряжения: $U_1 = +5$ кВ, $U_2 = +1.5$ кВ, $U_3 = +950$ В, $U_4 = 0$ В соответственно, ток коронного разряда 1 мкА.

Характеристики затвора исследовались для двух вариантов функционирования: управление затвором при помощи первой диафрагмы затвора (5) или второй диафрагмы затвора (6). Значения напряжений на диафрагме (4), электродах затвора (5, 6) и первого электрода системы электростатической транспортировки (7) в режимах пропускания и запирания при управлении первым электродом затвора (5) представлены на рис. 7, а, значения напряжений на диафрагме (4), электродах затвора (5, 6) и первого электрода системы электростатической транспортировки (7) в режимах пропускания и запирания при управлении вторым электродом затвора (6) представлены на рис. 7, б. Значения напряжений определялись в статическом (не импульсном) режиме. Запирающее напряжение определялось по полному отсутствию тока на коллекторе, а отпирающее — по полному току на коллекторе. На рис. 8 представлена осциллограмма временного профиля ионного пакета (пика), зарегистрированного на коллекторе (8) при длительности отпирающего электрического прямоугольного импульса $t = 50$ мкс, вид пика имеет симметричную форму.

Для изучения свойств ионных пиков, полученных с использованием бессеточного двухдиафрагменного затвора, исследовалась зависимость формы временного профиля пика и его временного смещения от длительности отпирающего импульса напряжения как для варианта с управлением

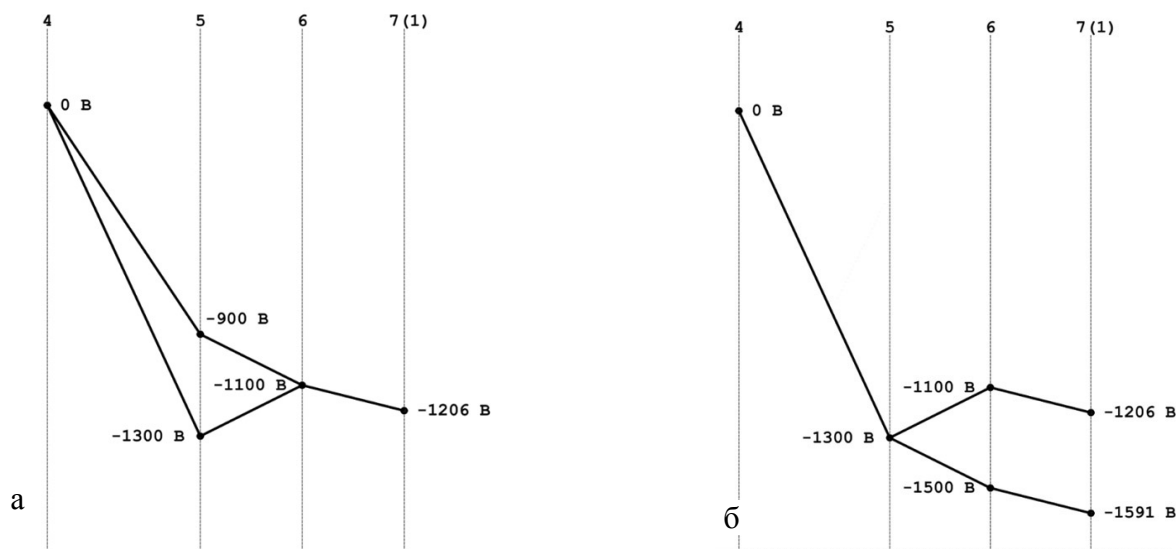


Рис. 7. Значения напряжений на диафрагме (4), электродах затвора (5, 6) и первом электроде системы электростатической транспортировки (7) в режимах пропускания и запирания при управлении первым электродом затвора (5) — а; значения напряжений на диафрагме (4), электродах затвора (5, 6) и первом электроде системы электростатической транспортировки (7) в режимах пропускания и запирания при управлении вторым электродом затвора (6) — б

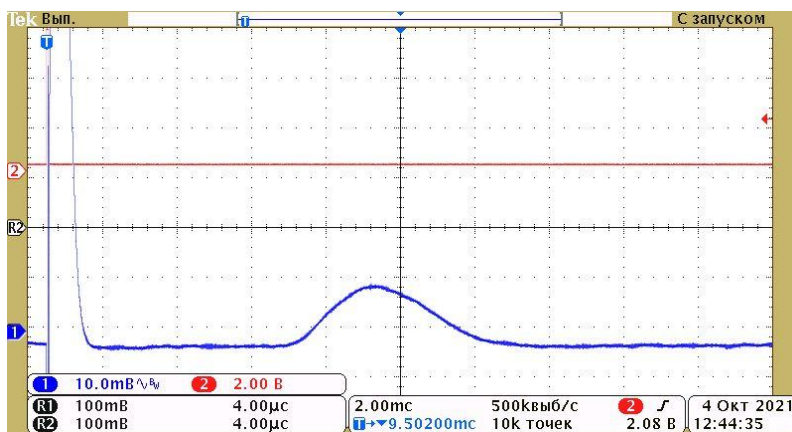


Рис. 8. Осциллограмма ионного пакета (пика) при длительности отпирающего прямоугольного импульса $t = 50 \mu\text{с}$

первым электродом затвора (5), так и вторым электродом затвора (6). На рис. 9 представлена суперпозиция серии осциллограмм форм временных профилей ионного тока для различных длительностей открывающих электрических импульсов на первом электроде (5) затвора. Длительности открывающих импульсов t : 1 — 20 мкс, 2 — 30 мкс, 3 — 50 мкс, 4 — 100 мкс, 5 — 200 мкс, 6 — 500 мкс, 7 — 1 мс, 8 — 2 мс, 9 — 4 мс, 10 — 6 мс, 11 — 8 мс. Формы временных профилей ионного тока для длительно-

стей открывающих импульсов, соответствующих временам 1–8, имеют симметричный вид без затягивания переднего фронта. Формы временных профилей ионного тока для длительностей открывающих импульсов, соответствующих временам 9–11, также имеют симметричный вид по сравнению с результатами, представленными в [14, 15], но при этом амплитуда ионного тока достигает максимума, соответствующего полному пропусканию ионов затвором во время открытия (8–11).

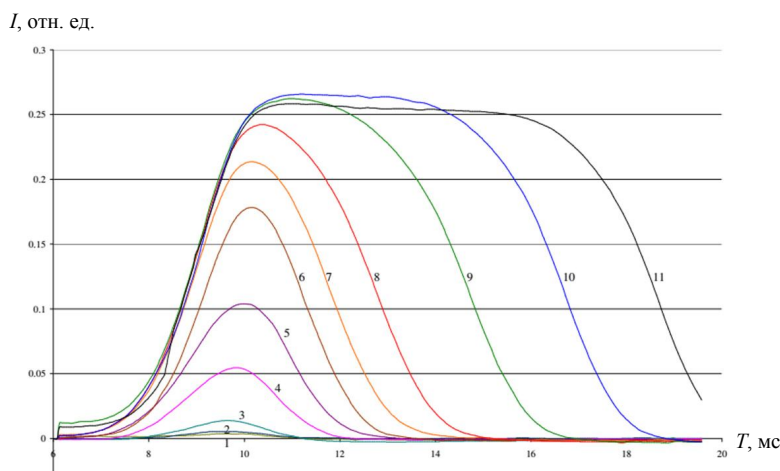


Рис. 9. Суперпозиция серии осциллограмм импульсов ионного тока для различных длительностей открывающих импульсов на первом электроде затвора.

Длительности открывающих импульсов t : 1 — 20, 2 — 30, 3 — 50, 4 — 100, 5 — 200, 6 — 500 мкс; 7 — 1, 8 — 2, 9 — 4, 10 — 6, 11 — 8 мс

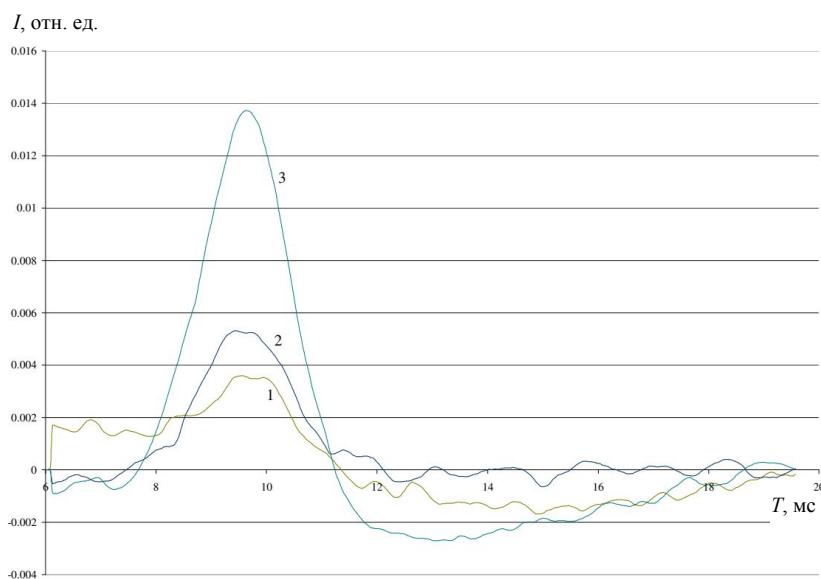


Рис. 10. Вид серии осциллограмм импульсов ионного тока для малых длительностей открывающих импульсов на первом электроде в увеличенном масштабе.

Длительности открывающих импульсов t : 1 — 20, 2 — 30, 3 — 50 мкс

На рис. 10 представлен вид серии осциллограмм форм временных профилей ионного тока для малых длительностей открывающих импульсов на первом (5) электроде в увеличенном масштабе по интенсивности. Длительности открывающих импульсов t : 1 — 20, 2 — 30, 3 — 50 мкс. Форма временных профилей ионных пиков симметрична по сравнению с модельными временными профилями ионных импульсов в зависимости от длительности открытия затвора, представленными на рис. 3.

На рис. 11 представлена суперпозиция серии осциллограмм форм временных профилей ионного тока для различных длительностей открывающих

импульсов на втором электроде (6) затвора. Длительности открывающих импульсов t : 1 — 20, 2 — 30, 3 — 50, 4 — 100, 5 — 200, 6 — 500 мкс; 7 — 1, 8 — 2, 9 — 4, 10 — 6, 11 — 8 мс. Формы временных профилей имеют вид, аналогичный представленным на рис. 9, но при этом максимальная амплитуда ионного тока на 30% меньше, чем при управлении первым электродом (5) затвора.

Осциллограммы форм временных профилей ионного тока для малых длительностей открывающих импульсов на втором (6) электроде представлены в увеличенном масштабе, рис. 12. Длительности открывающих импульсов t : 1 — 20,

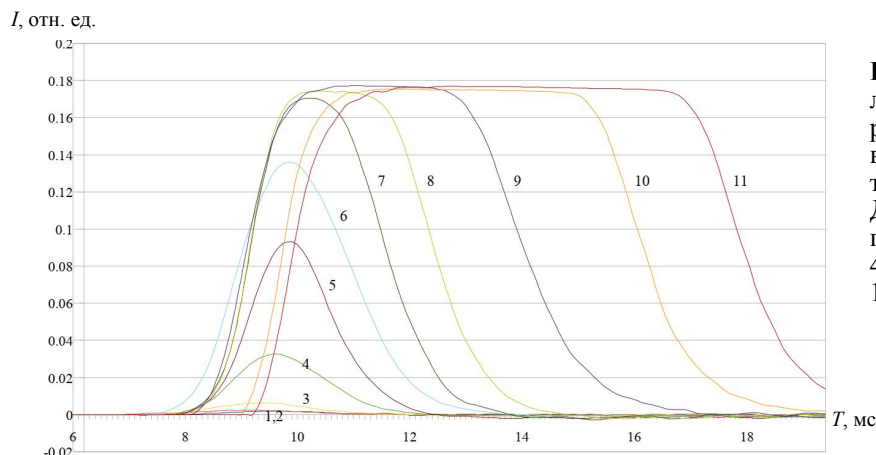


Рис. 11. Суперпозиция серии осциллограмм импульсов ионного тока для различных длительностей открывающих импульсов на втором электроде затвора.

Длительности открывающих импульсов t : 1 — 20, 2 — 30, 3 — 50, 4 — 100, 5 — 200, 6 — 500 мкс; 7 — 1, 8 — 2, 9 — 4, 10 — 6, 11 — 8 мс

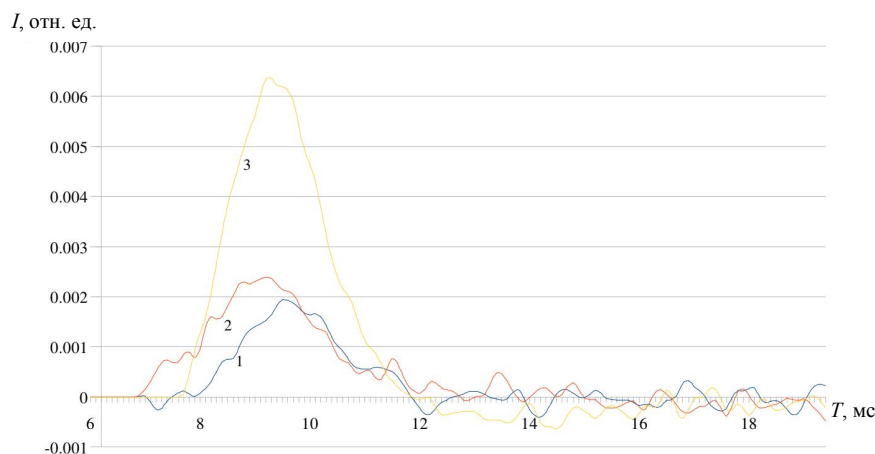


Рис. 12. Вид серии осциллограмм импульсов ионного тока для малых длительностей открывающих импульсов на втором электроде в увеличенном масштабе. Длительности открывающих импульсов t : 1 — 20, 2 — 30, 3 — 50 мкс

2 — 30, 3 — 50 мкс. Амплитуды профилей ионного тока при этих параметрах в 2 раза меньше, чем в случае управления затвором первым электродом (5).

Экспериментально исследованы формы временных профилей ионного тока, зарегистрированного на коллекторе на расстоянии 60 мм от второго электрода затвора (6) в зависимости от напряженности электрического поля в системе электростатической транспортировки ионных пакетов (7). На рис. 13 представлена суперпозиция серии форм временных профилей ионного тока для различной напряженности электрического поля в системе электростатической транспортировки при длительности открывающего импульса 500 мкс на первом электроде (5) затвора. Напряженности электрического поля E : 1 — 167, 2 — 250, 3 — 333, 4 — 416, 5 — 500, 6 — 583, 7 — 666 В/см.

На рис. 14 показана суперпозиция серии форм временных профилей ионного тока для различной напряженности электрического поля в системе

электростатической транспортировки при длительности открывающего импульса 500 мкс на втором электроде (6) затвора. Напряженности электрического поля E : 1 — 167, 2 — 250, 3 — 333, 4 — 416, 5 — 500, 6 — 583, 7 — 666 В/см.

Из представленных зависимостей на рис. 13 и 14 видно, что амплитуда временных профилей, полученных для напряженностей электрического поля в системе электростатической транспортировки в диапазоне от 416 до 666 В/см при длительности открывающего импульса 500 мкс на первом электроде (5), в 3.5 раза больше, чем при управлении вторым (6) электродом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен, теоретически и экспериментально исследован бессеточный двухэлектродный электрический затвор, работающий при атмосферном давлении. Управлять работой затвора

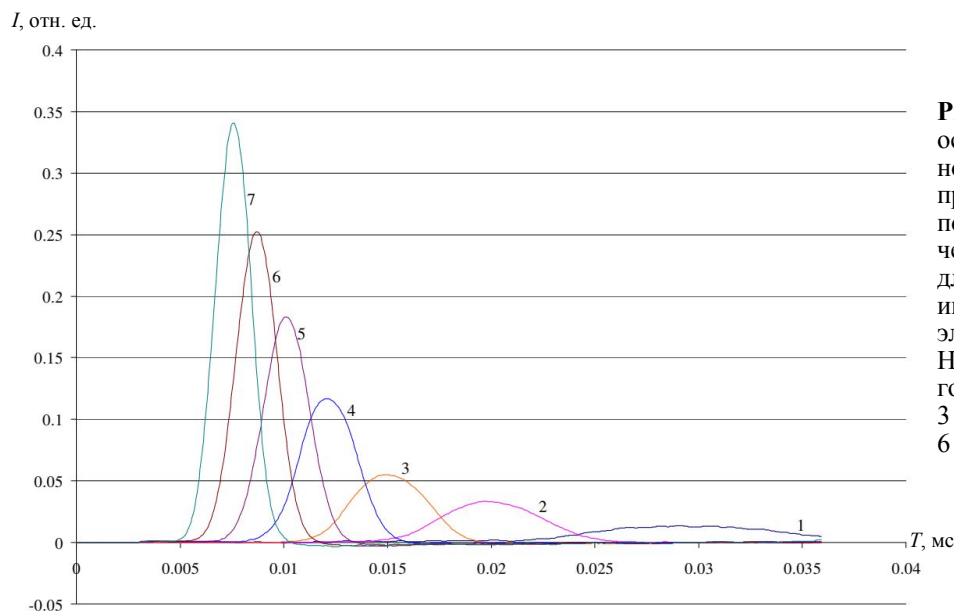


Рис. 13. Суперпозиция серии осциллограмм импульсов ионного тока для различной напряженности электрического поля в системе электростатической транспортировки при длительности открывающего импульса 500 мкс на первом электроде затвора. Напряженности электрического поля E : 1 — 167, 2 — 250, 3 — 333, 4 — 416, 5 — 500, 6 — 583, 7 — 666 В/см

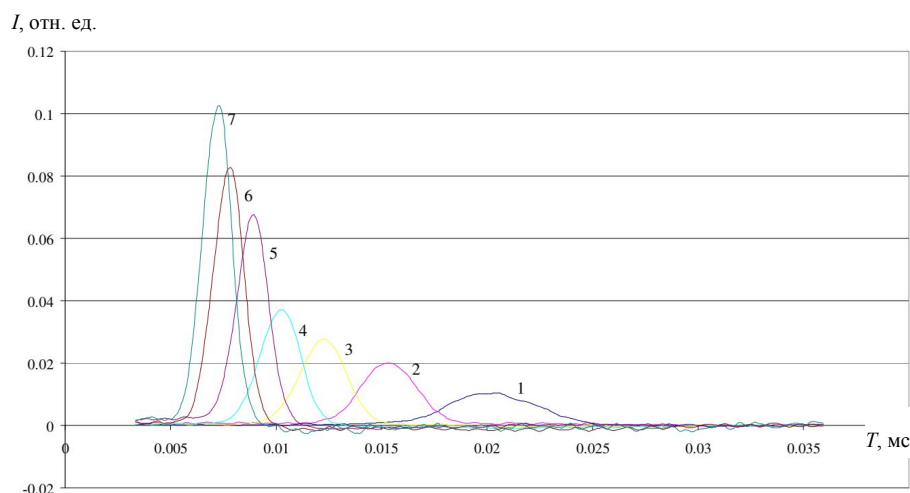


Рис. 14. Суперпозиция серии осциллограмм импульсов ионного тока для различной напряженности электрического поля в системе электростатической транспортировки при длительности открывающего импульса 500 мкс на втором электроде затвора. Напряженности электрического поля E : 1 — 167, 2 — 250, 3 — 333, 4 — 416, 5 — 500, 6 — 583, 7 — 666 В/см

возможно подачей открывающего импульса как на первый электрод, так и на второй. Экспериментально показано, что при всех режимах работы затвора (управление на первый или второй электроды затвора) формы временных профилей ионного тока имеют симметричный вид для длительностей открывающего импульса от 20 мкс до 8 мс. Амплитуда временных профилей больше при использовании первого электрода затвора на 30%, чем при использовании второго электрода, в зависимости от длительности открывающего импульса и в 3.5 раза больше в зависимости от напряженности электрического поля в системе электростатической транспортировки при напряженностях электрического поля от 416 до 666 В/см. Этот ре-

зультат, по-видимому, зависит от сложной временной зависимости напряженности электрического поля в системе электростатической транспортировки при подаче открывающего (управляющего) импульса на второй электрод затвора.

Авторы выражают благодарность ООО «Девайс Консалтинг» за поддержку, которая позволила выполнить эту работу.

Работа выполнена в рамках НИР 0074-2019-0009 (номер гос. регистрации AAAA-A19-119053190069-2), входящей в состав госзадания № 075-00980-19-02 ИАП РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bradbury N.E., Nielsen R.A. Absolute values of the electron mobility in hydrogen // *Phys. Rev.* 1936. Vol. 49, no. 5. P. 388. DOI: 10.1103/PhysRev.49.388
2. Tyndall A.M. The mobility of positive ions in gases. Cambridge University Press, ser. Cambridge Physical Tracts, UK, 1938.
3. Zühlke M., Zenichowski K., Riebe D., Beitz T., Löhmannsröben H.-G. An alternative field switching ion gate for ESI-ion mobility spectrometry // *International Journal for Ion Mobility Spectrometry*. 2017. Vol. 20, no. 3-4. P. 67–73. DOI: 10.1007/s12127-017-0222-y
4. Chen C., Chen H., Li H. Pushing the resolving power of Tyndall-Powell ion mobility spectrometry over 100 with no sensitivity loss for multiple ion species // *Anal. Chem.* 2017. Vol. 89, no. 24. P. 13398–13404. DOI: 10.1021/acs.analchem.7b03629
5. Курнин И.В., Самокиш В.А., Краснов Н.В. Моделирование работы ион-дрейфового спектрометра с затвором Бредбери – Нильсена // *Научное приборостроение*. 2010. Т. 20, № 3. С. 14–21.
6. Tang K., Shvartsburg A.A., Lee Hak-No, Prior D.C., Buschbach M.A., Li F., Tolmachev A.V., Anderson G. A., Smith R.D. High-sensitivity ion mobility spectrometry/mass spectrometry using electrodynamic ion funnel interfaces // *Anal. Chem.* 2005. Vol. 77, no. 10. P. 3330–3339. DOI: 10.1021/ac048315a
7. Reinecke T., Clowers B.H. Implementation of a flexible, open-source platform for ion mobility spectrometry // *HardwareX*. 2018. Vol. 4. Article e00030. DOI: 10.1016/j.ohx.2018.e00030
8. Arseniev A.N., Kurnin I.V., Krasnov N.V., Muradytov M.Z., Yavor M.I., Pomozev 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. P. 31–38. DOI: 10.1007/s12127-018-0242-2
9. Kurnin I.V., Krasnov N.V., Semenov S.Y., Smirnov V.N. Bradbury – Nielsen gate electrode potential switching modes optimizing the ion packet time width in an ion mobility spectrometer // *International Journal for Ion Mobility Spectrometry*. 2014. Vol. 17. P. 79–85. DOI: 10.1007/s12127-014-0152-x
10. Арсеньев А.Н., Алексеев Д.Н., Бельченко Г.В., Гаврик М.А., Краснов Н.В., Корякин П.С., Краснов И.А., Курнин И.В., Мяльдин Ш.У., Мурадымов М.З., Монаков А.Г., Павлов В.Г., Зверева А.В., Никитина С.Н., Подольская Е.П. Спектроскопия пептидов, белков и олигонуклеотидов из растворов методом ионной подвижности // *Научное приборостроение*. 2015. Т. 25, № 1. С. 17–26. URL: <http://iairas.ru/mag/2015/abst1.php#abst2>
11. Dahl D.A. SIMION 3D V. 7.0 User's manual. Idaho National Eng. Envir. Lab, 2000. 480 p.
12. Курнин И.В., Явор М.И. Модель движения в вязкой среде со статистической диффузией для расчета динамики ионов в плотном газе и сильных электрических полях // *Научное приборостроение*. 2015. Т. 25, № 3. С. 29–34. URL: <http://iairas.ru/mag/2015/abst3.php#abst4>
13. Курнин И.В. Универсальная модель для расчета динамики ионов в плотном газе и сильных электрических полях // *Научное приборостроение*. 2018. Т. 28, № 3. С. 118–123. URL: <http://iairas.ru/mag/2018/abst3.php#abst15>
14. Курнин И.В., Самокиш В.А., Краснов Н.В. Оптимальный режим работы затвора Бредбери – Нильсена в ион-дрейфовом спектрометре // *Научное приборостроение*. 2011. Т. 21, № 2. С. 34–39. URL: <http://iairas.ru/mag/2011/abst2.php#abst5>
15. Краснов Н.В., Паульс Я.И., Самокиш А.В., Самокиш В.А., Хасин Ю.И. Разрешающая способность ион-дрейфового спектрометра двойного последовательного разделения ионов с ионизацией коронным разрядом // *Научное приборостроение*. 2007. Т. 17, № 1. С. 40–49. URL: <http://iairas.ru/mag/2007/abst1.php#abst6>

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург (Курнин И.В., Краснов Н.В., Арсеньев А.Н., Подольская Е.П.)

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Черепанов А.Г.)

ООО "Девайс Консалтинг" (Краснов М.Н.)

Контакты: Курнин Игорь Васильевич,
igor.kurnin@gmail.com

Материал поступил в редакцию 22.10.2021

CHARACTERISTICS OF A GRIDLESS TWO-DIAPHRAGM ION GATE AT ATMOSPHERIC PRESSURE

I. V. Kurnin¹, N. V. Krasnov¹, A. N. Arseniev¹, A. G. Cherepanov²,
M. N. Krasnov³, E. P. Podolskaya¹

¹*Institute for Analytical Instrumentation of RAS, Saint Petersburg, Russia*

²*St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great, Russia*

³*Device Consulting Ltd, Saint Petersburg, Russia*

As an ion gate for the formation of a short ion pulse in an ion mobility spectrometer, a gridless design with two coaxial diaphragms is proposed. It has been experimentally shown that, depending on the geometric and electrical parameters of this shutter, there is an optimal duration of the electric pulse opening the gate, which provide the maximum amplitude of the ion pulse.

Keywords: ion source, ion gate, ion transport at atmospheric pressure, ion mobility spectrometer

INTRODUCTION

An important element of an ion mobility spectrometer is an ion shutter located between the source of a continuous flow of charged particles and the entrance to the drift tube and designed to form an ion packet in the drift region with subsequent separation of ions by mobility. The shape of the ion packet and its amplitude characterize the resolution and sensitivity of the mobility spectrometer. At present, for the formation and injection of an ion packet, grid ion shutters of Bradbury – Nielsen [1], Tyndall – Powell [2], and a three-grid ion shutter [3] are used. It was noted in [4] that these ion shutters exhibit, to one degree or another, discrimination of ion mobility. This degrades the resolution of ion mobility spectrometers. Significant disadvantages of grid ion shutters include their low geometric transparency for the ion beam, of the order of 60%, which contributes to a decrease in sensitivity; also, scattering of ions on grids leads to broadening of the ion packet and as a consequence to the deterioration of the resolution. Also, the disadvantages of grid ion shutters can be attributed to the technological complexity of their manufacture, the breakage of wires and the closure of adjacent wires with opposite potentials, which leads to the inoperability of the shutter. The diameter of the aperture of the used ion shutters, as a rule, is 2–2.5 cm. In terms of such sizes, grids of various designs are used to form the shutter electric field structure, allowing to form a packet of ions with sharp boundaries (fronts) and minimal distortions: parallel conductive wires of small diameter (50 μm) with an interval from 0.2 to 1 mm [5, 6] or apertures in the form of a strainer [7]. An alternative to grid shutters can be double-diaphragm shutters with a small aperture diameter of the order of

2 mm and without a grid. Such aperture diameters make it possible to create the necessary structure of the electric field in the shutter, which forms ion packets no worse than grid shutters, but at the same time has a greater transparency and simplicity of design.

Continuous ion beams with a diameter of 2 mm can be obtained either using an ion funnel [6] containing a huge number (tens) of electrodes with a variable aperture diameter from 20 mm to 2 mm (funnel is used in the drift region at pressures of the order of 1 Torr using a constant voltage and high-frequency voltage), or a transportation system at atmospheric pressure [8], consisting of three to four electrodes with variable apertures from 4 to 1.2 mm and operating at atmospheric pressure and constant voltages on the electrodes.

In this paper, we propose a new design of a gridless ion shutter consisting of two diaphragms, and present the experimental results of its work on converting a continuous ion current into pulsed ion packets at atmospheric pressure, and compare the results with the characteristics of grid shutters.

GRIDLESS DOUBLE DIAPHRAGM ION SHUTTER. THEORETICAL BACKGROUND

The proposed gridless ion shutter is designed to convert a continuous ion beam into a sequence of charged particle packets entering the analyzer with a given frequency and duration, and is a pair of insulated conducting parallel diaphragms with coaxial holes. One of the diaphragms is under regulated voltages from an independent power source, and the other diaphragm is electrically connected with an independent switching power supply with adjustable duration, frequency and voltage amplitude. The superpo-

sition of electric fields in a two-electrode shutter in the closed and open shutter modes is shown in Fig. 1 and Fig. 2. In the case of a closed shutter, ions get lost on the first diaphragm, because the potential of the second diaphragm is higher than the potential of the first one.

Fig. 1. Spatial potential distribution in the case of a closed gridless double diaphragm shutter. Ion trajectories shown

Fig. 2. Spatial potential distribution in the case of an open gridless double diaphragm shutter. Ion trajectories shown

When the potential of the second diaphragm decreases relative to the first, ions enter the drift region of the ion-mobility spectrometer. A pulse lowering of this potential generates a short ion pulse. In addition, because of a shutter design, the trailing edge of the formed ion pulse is compressed, since upon closing, ions are pushed out of the region of a nonuniform electric field, whereas in the case of the Bradbury – Nielsen shutter, this is done in a special way [9]. The proposed gridless ion shutter is simple in design and can be easily used in our ion-mobility spectrometer [10].

Simulation of a gridless double-diaphragm shutter was carried out with the software package SIMION 7 [11]. The purpose was to determine shutter characteristics and operating modes providing a short ion pulse (packet) with the maximum possible amplitude at the output. The previously developed model [12] implemented in the prg-program [13] was used to calculate ion motion in gas at atmospheric pressure in strong electric fields. The program takes into account the diffusion of ions in a dense gas and their movement in an electric field with regard to coefficient of mobility.

We considered a shutter with diaphragm plates with a thickness of 0.2 mm, a distance between them of 0.2 mm and a hole diameter of both diaphragms of 2 mm. In order to determine the parameters of the output ion pulse during the simulation, the shutter opening duration was varied $dt = 20\text{--}50\ \mu\text{s}$. Fig. 3 shows the time profiles of ion pulses for an opening pulse amplitude of $-100\ \text{V}$ and a fixed mobility coefficient $K_0 = 3\ \text{cm}^2 / (\text{V s})$. It can be seen that there is an optimal duration of the shutter opening, corresponding to a narrow output ion peak of sufficient amplitude. For the simulated conditions, the value of the optimal shutter opening duration is $dt = 30\ \mu\text{s}$, profile 2 in Fig. 3.

Fig. 3. Simulated time profiles of ion pulses depending on the gate opening duration

In this case, the ion peak formed by ions with a shorter opening duration (profile 1, $20\ \mu\text{s}$) turns out to be much smaller in amplitude, and the corresponding value of the ion peak duration increases several times. Profiles 2 ($30\ \mu\text{s}$) and 3 ($50\ \mu\text{s}$) are not symmetrical; moreover, profile 3 is strongly extended towards longer times in duration.

EXPERIMENTAL DEVICE

For the experimental study of the characteristics of a gridless double-diaphragm electric shutter operating at atmospheric pressure in a resting gas (laboratory air) under normal conditions and affecting conversion of a continuous ion beam into a sequence of ion packets, a small-sized experimental device with simple design was created. Its design is shown in Fig. 4.

Fig. 4. Design of an experimental device for studying the characteristics of a gridless double-electrode gate.

1 — corona tip, 2 — counter electrode, 3 — double-electrode system for transporting a continuous ion beam to the 1st shutter electrode, 4 — double-electrode gridless shutter, 5 — system of electrostatic transportation of ion packets (peaks) to the collector, 6 — collector

Fig. 5. Scheme of the experimental device.

1 — corona tip; 2 — anode in the form of a thin-walled diaphragm; 3, 4 — two thin-walled diaphragms; 5, 6 — gridless electric shutter diaphragms; 7 — system for electrostatic transportation of ion packets (peaks); 8 — collector; 9, 10, 11, 12 — digital current meters; 13, 14, 15, 16, 21, 23, 28 — controlled high-voltage highly stable power supplies; 17, 24, 25, 27 — resistors; 18, 26 — capacitors; 19 — switch; 20 — pulse generator; 22 — grounding; 29 — amplifier; 30 — optoelectronic decoupling; 31 — two-channel oscilloscope

Fig. 5 shows a diagram of the experimental device. Further in the text, all references with position numbers to the elements of the experimental device are given in accord to Fig. 5. For simplicity of the experiment, a tip (needle) (1) with a positive corona discharge was used as the surface, emitting charged particles. At a distance of 5 mm from the needle, the anode was coaxially located in the form of a thin-walled diaphragm (2), which is the first electrode of the charged particle transport system, including two more thin-walled diaphragms (3) and (4). The diaphragms (2), (3), (4) have a thickness of 0.2 mm and are located at a distance of 1 mm from each other; the diameters of the holes in the diaphragms (2), (3) and

(4) are 4, 2.5, and 2.5 mm, respectively. Behind the diaphragm (4), at a distance of 3 mm, there is a gridless electric shutter that generates the ion pulse and is an assembly of two thin-walled diaphragms (5) and (6) 0.2 mm thick with central holes 2 mm in diameter and located at a distance of 2 mm from each other. Further, at a distance of 1 mm from the second shutter diaphragm (6), there is a system for electrostatic transport of ion packets (peaks) (7), consisting of a set of sequentially located diaphragms with an inner diameter of 10 mm at a distance of 2 mm from each other, the total length of the system is 60 mm. 2 mm behind the last electrode of the system (7), there is a collector (8) in the form of a flat circle with a diameter of 8 mm. The electrodes (1), (2), (3), (4) receive regulated high-stability high voltages from the corresponding power channels, each of which includes a digital current meter Digital Multimeter UT33C+UNIT (9), (10), (11), (12), Applied Kilovots high-voltage controlled high-stability power supply (13-15) with the required adjustment ranges and polarity, the second pole of which has the ground potential. The first shutter electrode (5) is always supplied with a constant regulated voltage from a high-voltage high-stability source Applied Kilovolts (16) with a nominal value of 2.5 kV through a resistor (17). A rectangular voltage pulse with adjustable amplitude and duration is supplied to the same electrode in mode I of shutter operation through a separation capacitor 0.1 μ F, 3 kV (18) through the AB circuit from the switch (19). The switch is connected to a pulse generator TGP 110 10 MHz Pulse Generator (England) (20) via logic input X1, to a highly stable source Applied Kilovolts (21) with a nominal value of 0.5 kV via the first analog input (AI1), and to ground (22) via the second analog input (AI2). The second shutter electrode (6) and the first electrode of the system of electrostatic transport of ion packets 7 (1) are always supplied with a constant regulated high voltage from a highly stable high-voltage source Applied Kilovolts (23) with a nominal value of 2.5 kV through resistors (24) and (25). A blocking capacitor (26) is located between the electrodes (6) and (7). In mode II of the shutter operation, a rectangular voltage pulse with adjustable amplitude and duration is supplied from the switch (19) through the AC circuit to the electrode (6). Constant regulated voltages are always supplied to the electrodes of the system of electrostatic ion packets transportation (7) from a resistive divider (27), which, on the one hand, is connected to a highly stable high-voltage adjustable source Applied Kilovolts (23), and on the other to a highly stable high-voltage adjustable source Applied Kilovolts (28), the second pole of which has the ground potential. In addition, the collector (8) and amplifier (29) have the potential of the high voltage source (28). Signal from the collector (8) goes to the amplifier (29) and through the optocoupler (30) to the input of the Tektronix DPO 3032 two-

channel oscilloscope (31). An electric rectangular control pulse, applied to the shutter, has the following characteristics: the pulse duration can vary from 10 μ s to 8 ms, the amplitude can vary from 100 to 1000 V, the pulse rise time is 100 ns.

The high-voltage sources were powered from a Mean Well S-240-24 switching power supply connected to a $\sim$ 220 V network, power consumption — up to 240 W, output voltage — 24 V, load current — up to 10 A, with protection against overloads, short circuits and power surges.

The electrodes of the analytical part of the experimental device were made according to the technology of printed circuit board (PCB) production [7]. On the electrodes at the holes there is a double-sided metallic conductive layer in the form of a ring 1 mm wide, this layer also covers the inner edge of the hole in the electrode (Fig. 6). Dielectric spacers are made of the same material as the electrodes, but not covered with metal. The inner diameters in dielectric spacers are 10 mm in order to avoid charging the dielectric.

Fig. 6. Photograph of shutter diaphragm with internal diameter of 2 mm

Study of the operation of a gridless diaphragm shutter in regard to the value of the given potentials supplied to the electrodes was carried out according to the following method. In all experiments, the current of the positive corona discharge was set on the needle at approximately 0.5 and 1 μ A. The value of the voltages applied to the electrodes (2), (3), (4) was selected in such a way that a minimum of ion current fell on the electrodes of the transport system.

The needle (1) – anode (2) system made it possible to obtain an independent, relatively stable source of charged particles at atmospheric pressure. The voltages applied to the other electrodes of the system either did not affect or only slightly affected the magnitude of the corona discharge current and did not distort the qualitative nature of the results.

EXPERIMENT

In an experimental study of the characteristics of a gridless two-electrode electric shutter, the following voltages were applied to electrodes (1–4): $U_1 = +5$ kV, $U_2 = +1.5$ kV, $U_3 = +950$ V, $U_4 = 0$ V, respectively, the corona discharge current is 1 μ A.

The shutter characteristics were investigated for two options of operation: shutter control using the first shutter diaphragm (5) or the second shutter diaphragm (6). The values of the voltages of the diaphragm (4), shutter electrodes (5, 6) and the first electrode of the electrostatic transportation system (7) in transmission

and blocking modes when controlling the first shutter electrode (5) are shown in Fig. 7, a, the values of the voltages of the same units in transmission and locking modes when controlling the second shutter electrode (6) are shown in Fig. 7, б. The voltage values were determined in a static (not pulse) mode. The blocking voltage was determined by the complete absence of current to the collector, and the triggering voltage was determined by the total current to the collector.

Fig. 7. Values of voltages on diaphragm (4), gate electrodes (5, 6) and first electrode of electrostatic transportation system (7) in transmission and locking modes at control of first electrode of gate (5) — а; values of voltages at diaphragm (4), gate electrodes (5, 6) and first electrode of electrostatic transportation system (7) in transmission and locking modes at control of second electrode of gate (6) — б

Fig. 8 shows an oscillogram of the time profile of the ion packet (peak) recorded at the collector (8) for the duration of the triggering electric rectangular pulse $t = 50 \mu\text{s}$; the peak has a symmetrical shape.

To study the properties of ion peaks, obtained with the use of a gridless double-diaphragm shutter, the dependence of the shape of the time profile of the peak and its time shift on the duration of the unlocking voltage pulse was investigated for the options both with control of the first shutter electrode (5) and the second shutter electrode (6).

Fig. 8. Oscillogram of ion packet (peak) at duration of opening rectangular pulse $t = 50 \mu\text{s}$

Fig. 9. Superposition of series of oscillograms of ion current pulses for different duration of opening pulses on the first gate electrode.
Duration of opening pulses t : 1 — 20, 2 — 30, 3 — 50, 4 — 100, 5 — 200, 6 — 500 μs ; 7 — 1, 8 — 2, 9 — 4, 10 — 6, 11 — 8 ms

Fig. 9 shows a superposition of a series of oscillograms of the forms of the time profiles of the ion current for different durations of the triggering electric pulses on the first electrode (5) of the shutter. Triggering pulse durations t : 1 — 20 μs , 2 — 30 μs , 3 — 50 μs , 4 — 100 μs , 5 — 200 μs , 6 — 500 μs , 7 — 1 ms, 8 — 2 ms, 9 — 4 ms, 10 — 6 ms, 11 — 8 ms. The shapes of the time profiles of the ion current for the durations of the triggering pulses, corresponding to times 1–8, have a symmetrical form without the leading edge pulling. The shapes of the time profiles of the ion current for the durations of the triggering

pulses, corresponding to the times 9–11, also have a symmetrical form in comparison with the results presented in [14, 15], but the amplitude of the ion current reaches a maximum, corresponding to the total transmission of ions by the shutter during the opening (8–11).

Fig. 10. View of series of oscillograms of ion current pulses for small duration of opening pulses on the first electrode in increased scale.
Duration of opening pulses t : 1 — 20, 2 — 30, 3 — 50 μs

Fig. 10 shows a series of oscillograms of the forms of the time profiles of the ion current for short durations of the opening pulses on the first (5) electrode on an enlarged scale in intensity. The duration of the opening pulses t : 1 — 20 μs , 2 — 30 μs , 3 — 50 μs . The shape of the time profiles of the ion peaks is symmetric in comparison with the simulated time profiles of ion pulses depending on the duration of the shutter opening, shown in Fig. 3.

Fig. 11. Superposition of series of oscillograms of ion current pulses for different durations opening pulses on the second gate electrode.
Duration of opening pulses t : 1 — 20, 2 — 30, 3 — 50, 4 — 100, 5 — 200, 6 — 500 μs ; 7 — 1, 8 — 2, 9 — 4, 10 — 6, 11 — 8 ms

Fig. 11 shows a superposition of a series of oscillograms of the forms of the time profiles of the ion current for different durations of the triggering pulses on the second electrode (6) of the shutter. Opening pulse durations t : 1 — 20 μs , 2 — 30 μs , 3 — 50 μs , 4 — 100 μs , 5 — 200 μs , 6 — 500 μs , 7 — 1 ms, 8 — 2 ms, 9 — 4 ms, 10 — 6 ms, 11 — 8 ms. The shapes of the time profiles are similar to those shown in Fig. 10, but the maximum amplitude of the ion current is 30% less than in the case of controlling the shutter with the first electrode (5).

Fig. 12. View of series of oscillograms of ion current pulses for small duration of opening pulses on the second electrode in increased scale. Duration of opening pulses t : 1 — 20, 2 — 30, 3 — 50 μs

Oscillograms of the forms of the time profiles of the ion current for short durations of the triggering pulses on the second (6) electrode are shown on an enlarged scale, Fig. 12. Triggering pulse durations t : 1 — 20 μs , 2 — 30 μs , 3 — 50 μs . The amplitudes of the ion current profiles for these parameters are 2 times less than in the case of controlling the shutter with the first electrode (5).

Fig. 13. Pulse oscillogram series superposition ion current for different electric field strength in electrostatic transport system with duration of opening pulse 500 μ s on the first gate electrode.

Electric field intensity E : 1 — 167, 2 — 250, 3 — 333, 4 — 416, 5 — 500, 6 — 583, 7 — 666 V/cm

Experimental research was conducted to study the shapes of the time profiles of the ion current, recorded on the collector at a distance of 60 mm from the second shutter electrode (6) depending on the electric field strength in the system of electrostatic transport of ion packets (7). Fig. 13 shows a superposition of a series of ion current time profile shapes for different electric field strengths in an electrostatic transport system with a triggering pulse duration of 500 μ s on the first shutter electrode (5). Electric field strength E : 1 — 167 V / cm, 2 — 250 V / cm, 3 — 333 V / cm, 4 — 416 V / cm, 5 — 500 V / cm, 6 — 583 V / cm, 7 — 666 V / cm.

Fig. 14. Pulse oscillogram series superposition ion current for different electric field strength in electrostatic transport system with duration of opening pulse 500 μ s on the second gate electrode.

Electric field strength E : 1 — 167, 2 — 250, 3 — 333, 4 — 416, 5 — 500, 6 — 583, 7 — 666 V/cm

Fig. 14 shows the superposition of a series of ion current time profiles for various electric field strengths in the electrostatic transport system with a triggering pulse duration of 500 μ s on the second shutter electrode (6). Electric field strength E : 1 — 167, 2 — 250, 3 — 333, 4 — 416, 5 — 500, 6 — 583, 7 — 666 V / cm.

Fig. 14 and 15 show that the amplitude of the time profiles obtained for the electric field strengths in the electrostatic transportation system in the range from 416 to 666 V / cm with a triggering pulse duration of 500 μ s on the first electrode (5) is in 3.5 times more than that formed when the first electrode of the shutter is controlled (6).

CONCLUSION

The paper proposes, theoretically and experimentally investigated a gridless two-electrode electric shutter operating at atmospheric pressure. It is possible to control the operation of the shutter by applying a triggering pulse to both the first electrode and the second one. It has been shown experimentally that for all operating modes of the shutter (control of the first or second shutter electrodes), the shapes of the time profiles of the ion current have a symmetrical form for the duration of the triggering pulse from 20 μ s to 8 ms. The amplitude of the time profiles is 30% larger

when using the first shutter electrode comparatively to using the second shutter electrode, depending on the duration of the triggering pulse, and 3.5 times bigger if the electric field strength in the electrostatic transportation system is in the range from 416 to 666 V / cm.

This result apparently depends on the complex time dependence of the electric field strength in the electrostatic transportation system when a triggering (control) pulse is applied to the second shutter electrode.

REFERENCES

1. Bradbury N.E., Nielsen R.A. Absolute values of the electron mobility in hydrogen. *Phys. Rev.*, 1936, vol. 49, no. 5, pp. 388. DOI: 10.1103/PhysRev.49.388
2. Tyndall A.M. *The mobility of positive ions in gases*. Cambridge, Cambridge University Press, ser. Cambridge Physical Tracts, UK, 1938.
3. Zühlke M., Zenichowski K., Riebe D., Beitz T., Löhmannsröben H.-G. An alternative field switching ion gate for ESI-ion mobility spectrometry. *International Journal for Ion Mobility Spectrometry*, 2017, vol. 20, no. 3-4, pp. 67–73. DOI: 10.1007/s12127-017-0222-y
4. Chen C., Chen H., Li H. Pushing the resolving power of Tyndall-Powell ion mobility spectrometry over 100 with no sensitivity loss for multiple ion species. *Anal. Chem.*, 2017, vol. 89, no. 24, pp. 13398–13404. DOI: 10.1021/acs.analchem.7b03629
5. Kurnin I.V., Samokish V.A., Krasnov N.V. [Simulation of the operational mode of ion mobility spectrometer with Bradbury – Nielsen ion gate]. *Nauchnoe Priborostroenie [Scientific Instrumentation]*, 2010, vol. 20, no. 3, pp. 14–21. URL: <http://iairas.ru/en/mag/2010/abst3.php#abst3> (In Russ.).
6. Tang K., Shvartsburg A.A., Lee Hak-No, Prior D.C., Buschbach M.A., Li F., Tolmachev A.V., Anderson G.A., Smith R.D. High-sensitivity ion mobility spectrometry/mass spectrometry using electrodynamic ion funnel interfaces. *Anal. Chem.*, 2005, vol. 77, no. 10, pp. 3330–3339. DOI: 10.1021/ac048315a
7. Reinecke T., Clowers B.H. Implementation of a flexible, open-source platform for ion mobility spectrometry. *HardwareX*, 2018, vol. 4, article e00030. DOI: 10.1016/j.ohx.2018.e00030
8. Arseniev A.N., Kurnin I.V., Krasnov N.V., Muradyanov 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. DOI: 10.1007/s12127-018-0242-2
9. Kurnin I.V., Krasnov N.V., Semenov S.Y., Smirnov V.N. Bradbury – Nielsen gate electrode potential switching modes optimizing the ion packet time width in an ion mobility spectrometer. *International Journal for Ion Mobility Spectrometry*, 2014, vol. 17, pp. 79–85. DOI: 10.1007/s12127-014-0152-x

10. Arseniev A.N., Alekseev D.N., Belchenko G.V., Gavrik M.A., Krasnov N.V., Koryakin P.S., Krasnov I.A., Kurnin I.V., Myaldzin Sh.U., Muradymov M.Z., Monakov A.G., Pavlov V.G., Zvereva A.V., Nikitina S.N., Podolskaya E.P., Prisyach S.S., Semenov S.Yu., Krasnov M.N., Samokish A.V. [Spectroscopy of peptides, proteins and oligonukleotides from solutions by ion mobility]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2015, vol. 25, no. 1, pp. 17–26. DOI: 10.18358/np-25-1-i1726 (In Russ.).
11. Dahl D.A. *SIMION 3D V. 7.0 User's manual*. Idaho National Eng. Envir. Lab, 2000. 480 p.
12. Kurnin I.V., Yavor M.I. [Model of motion in a viscous media with a statistic diffusion for calculation of ion dynamics in a dense gas and strong electric fields]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2015, vol. 25, no. 3, pp. 29–34. DOI: 10.18358/np-25-3-i2934 (In Russ.).
13. Kurnin I.V. [Model for simulation of ion dynamics in a dense gas and strong electric fields]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2018, vol. 28, no. 3, pp. 118–123. DOI: 10.18358/np-28-3-i118123 (In Russ.).
14. Kurnin I.V., Samokish V.A., Krasnov N.V. [Optimal operational mode of Bradbury—Nielsen ion gate in an ion mobility spectrometer]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2011, vol. 21, no. 2, pp. 34–39. (In Russ.). URL: <http://iairas.ru/en/mag/2011/abst2.php#abst5>
15. Krasnov N.V., Pauls Y.I., Samokish A.V., Samokish V.A., Khasin Yu.I. [The resolving power of ion mobility spectrometer with double consecutive ion separation at corona discharge ionization]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2007, vol. 17, no. 1, pp. 40–48. (In Russ.). URL: <http://iairas.ru/en/mag/2007/abst1.php#abst6>

Contacts: *Kurnin Igor' Vasil'evich*,
igor.kurnin@gmail.com

Article received by the editorial office on 22.10.2021