

УДК 537.534.7: 621.319.7

© А. С. Бердников

МЕНЯЮЩИЙСЯ ВО ВРЕМЕНИ ПСЕВДОПОТЕНЦИАЛ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ К ОПИСАНИЮ УСРЕДНЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ. Ч. 4. ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА

На основе разработанной общей теории предложен новый класс устройств для транспортировки заряженных частиц, использующих высокочастотные электрические поля с архимедовыми свойствами эффективно-го потенциала. Данная работа посвящена рассмотрению разнообразных масс-спектрометрических устройств, которые могут быть созданы на базе высокочастотных электрических полей подобного типа, и сравнению этих устройств с их прототипами.

Кл. сл.: масс-спектрометрические приборы, радиочастотные приборы, эффективный потенциал, высокочастотные электрические поля, радиочастотные электрические поля

ВВЕДЕНИЕ

В предыдущих работах этого цикла были кратко очерчены возможности использования высокочастотных электрических полей с архимедовыми свойствами (т. е. таких полей, у которых псевдопотенциал представляет собой функцию с чередующимися максимумами и минимумами, перемещающимися во времени вдоль канала транспортировки заряженных частиц). Получена общая формула для медленно меняющегося эффективно-го потенциала высокочастотного электрического поля, характеризуемого "медленным" и "быстрым" временем изменения электрического поля. Проведен анализ временных сигналов с "быстрым" и "медленным" временем и получена общая формула параметризованного представления подобных сигналов. В данной работе цикла будут рассмотрены некоторые практические приложения высокочастотных электрических полей с архимедовыми свойствами для создания масс-спектрометрических приборов и проведено сравнение с существующими аналогами.

Предложенный новый способ управления движением заряженных частиц с помощью высокочастотных электрических полей специального вида, теоретические основы которого были рассмотрены в предыдущих работах данного цикла, обеспечивает не существовавшие ранее возможности для реализации разнообразных технических устройств. А именно с помощью специальным образом организованных высокочастотных полей можно захватывать в локальные зоны устойчивости заряженные частицы с разными массами, энергиями и зарядами и синхронно перемещать

указанные зоны захвата заряженных частиц в выбранной области пространства. Захваченные заряженные частицы перемещаются синхронно с перемещением областей захвата заряженных частиц, и тем самым осуществляется целенаправленное управление транспортировкой заряженных частиц. Характерной особенностью указанного способа является то, что в локальной области захвата объединяются как положительно, так и отрицательно заряженные частицы.

Высокочастотные электрические поля, обладающие указанным свойством, характеризуются псевдопотенциалом с чередующимися максимумами и минимумами, причем расположение областей захвата соответствует минимумам псевдопотенциала, а размер каждой области захвата определяется высотой соседних с минимумом максимумов псевдопотенциала (иными словами, псевдопотенциальных барьеров, ограничивающих область захвата). Указанные максимумы и минимумы перемещаются вдоль канала транспортировки заряженных частиц в процессе изменения псевдопотенциала во времени, приводя к синхронизированному во времени перемещению захваченных заряженных частиц с разными массами, зарядами и энергиями. По априорно заданной форме волны псевдопотенциала осуществляется восстановление соответствующего высокочастотного электрического поля и, как следствие, можно определить требуемое расположение электродов и прикладываемые к ним электрические напряжения. Класс высокочастотных электрических полей, для которых псевдопотенциал представляет собой функцию с чередующимися локальными максимумами

и минимумами, перемещающимися во времени вдоль некоторого пути, был назван автором работы архимедовыми высокочастотными полями по аналогии с винтом Архимеда [1, 2].

Одним из важных практических приложений такого способа управления заряженными частицами является разбиение непрерывного пучка заряженных частиц (или содержимого накопительного устройства заряженных частиц) на дискретные и синхронизированные во времени пакеты заряженных частиц *без потери исходных заряженных частиц*. Один из вариантов такого устройства был продемонстрирован в первой работе цикла [3], но, вообще говоря, класс возможных технических решений для источника ионов, обеспечивающих разбиение без потерь непрерывного потока ионов на дискретные и синхронизированные во времени пакеты, указанным примером не ограничивается. Устройства самой разнообразной конструкции, основанные на использовании специальным образом сконструированных высокочастотных электрических полей с архимедовыми свойствами, могут применяться для создания эффективных интерфейсов, обеспечивающих стыковку непрерывно работающих источников ионов (в частности, газонаполненных) и дискретно работающих масс-анализаторов. При этом

а) обеспечивается непрерывное накопление заряженных частиц, поступающих из внешнего источника, концентрация их в виде дискретных пространственно сепарированных пакетов заряженных частиц, импульсный вброс в нужный момент времени накопленных заряженных частиц в масс-анализатор;

б) заряженные частицы, поступающие из источника ионов, используются масс-анализатором в полном объеме без потерь заряженных частиц в течение времени, необходимого для выполнения анализа ранее поступившего в масс-анализатор пакета заряженных частиц;

в) обеспечивается эффективное охлаждение (снижение средней кинетической энергии) заряженных частиц в процессе транспортировки в результате столкновения заряженных частиц с молекулами легкого нейтрального газа;

г) обеспечивается эффективная локализация заряженных частиц в окрестности канала транспортировки даже в тех случаях, когда демпфирующее действие нейтрального газа незначительно или отсутствует;

д) обеспечивается эффективное разбиение входной совокупности заряженных частиц на отдельные пространственно сепарированные пакеты, объединяющие частицы с разными массами, разными зарядами и разными начальными условиями (скоростями и координатами);

е) обеспечивается синхронная транспортировка указанных пакетов заряженных частиц от входа к

выходу в соответствии с требуемым законом от времени;

ж) обеспечивается загрузка пакетов заряженных частиц в работающий в дискретном режиме в соответствии с временным графиком рабочего цикла указанного масс-анализатора;

з) обеспечивается возможность объединять в едином транспортируемом пакете положительно и отрицательно заряженные частицы;

и) обеспечивается возможность дополнительных внешних воздействий на локализованные пространственные пакеты заряженных частиц в процессе их транспортировки.

Следует также отметить, что такие интерфейсы, обеспечивающие стыковку непрерывно работающих газонаполненных источников ионов и дискретно работающих масс-анализаторов, являются лишь одним из возможных практических применений указанного способа управления движением заряженных частиц с помощью высокочастотных электрических полей, организованных по принципу архимедова винта. Например, такие поля и соответствующие им технические устройства можно использовать с целью создания газонаполненных охлаждающих ячеек, ионных воронок (ion funnel), столкновительных ячеек для фрагментации ионов, ион-молекулярных реакторов, ионных ловушек, накопительных устройств для заряженных частиц, управляемых масс-фильтров и других ионных транспортирующих систем с разнообразными дополнительными функциями.

1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Использование высокочастотных электрических полей для манипулирования заряженными частицами в масс-спектрометрии имеет давнюю традицию. Исторически первыми устройствами этого класса являются, по-видимому, радиочастотные квадрупольные масс-анализаторы (а также масс-сепараторы и масс-фильтры), использующие квадратичные электрические поля [4–6]. Задачей этих устройств является отобрать из совокупности заряженных частиц те частицы, которые характеризуются определенным отношением массы к заряду.

Основными типами масс-анализаторов, использующих радиочастотные поля, являются квадрупольные фильтры масс и ионные ловушки. Радиочастотные квадрупольные фильтры масс и ионные ловушки Пауля известны примерно с 1960-х годов. Оба типа масс-анализаторов предложены в патенте US2939952. Сравнительно недавно были придуманы линейные ионные ловушки с радиальным выбросом заряженных частиц из ловушки

(патент US420425) и выбросом ионов вдоль оси ловушки (патент US617768). Детальное описание принципов работы указанных устройств приводится, например, в [4–6].

Теоретической основой функционирования этих устройств являются зоны устойчивости, характеризующие решения уравнения Матвеева [7–10]. При правильно подобранных параметрах напряженности постоянного квадрупольного электрического поля, напряженности радиочастотного квадрупольного электрического поля только заряженные частицы с определенным отношением массы к заряду проходят через квадрупольный радиочастотный масс-фильтр. Остальные заряженные частицы теряют устойчивость движения и выбрасываются за пределы канала масс-фильтра.

Работа масс-анализаторов на основе ионных ловушек также в основном базируется на теории уравнения Матвеева. Эти масс-анализаторы используют квадратичное или почти квадратичное электрическое поле, достигаемое за счет применения идеальных гиперболических электродов, и заполнены легким газом при достаточно низком давлении газа. В этих устройствах заряженные частицы, после того, как их скорость гасится в результате многочисленных столкновений с молекулами газа, последовательно выбрасываются из устройства посредством раскачки группы заряженных частиц с нужным отношением массы к заряду с помощью радиочастотного электрического поля нужной частоты. Описываемая здесь картина является в достаточной степени приближенной, т. к. в практической масс-спектрометрии ионных ловушек разработаны и используются достаточно сложные способы изолирования, фрагментации и селективного выбрасывания из ловушки заряженных частиц за счет воздействия на частицы специальным образом сконструированными радиочастотными полями.

Еще одной важной группой радиочастотных устройств являются транспортирующие радиочастотные устройства. Их задачей является удержание пучка заряженных частиц различной массы в ограниченной области внутри устройства (например, вблизи оси устройства) и передача заряженных частиц из одной точки пространства (вход) в другую точку пространства (выход).

Широкий класс таких устройств основан на двумерном мультипольном поле или приближенном двумерном мультипольном поле, вытянутом вдоль третьей координаты. Эти устройства используются, например, для передачи ионов из газонаполненного источника ионов, функционирующего при достаточно высоких давлениях газа, в устройство для анализа ионов, функционирующее при гораздо более низком давлении газа или

просто в вакууме. Поскольку подобные линейные мультипольные ловушки не используются непосредственно для масс-анализа, строгая квадратичность или строгая мультипольность электрического поля не являются столь уж необходимыми и для упрощения технологии изготовления этих устройств гиперболические и мультипольные электроды, как правило, заменяются цилиндрическими стержнями или даже еще более огрубленными формами электродов.

При загрузке заряженных частиц в линейную мультипольную ловушку столкновения заряженных частиц с молекулами газа снижают их кинетическую энергию и заставляют группироваться вблизи оси устройства (патент US4963736). При этом обеспечивается выполнение такой важной функции, как охлаждение и пространственное сжатие пучка заряженных частиц с целью уменьшения эмиттанса пучка (т. е. размера в фазовом пространстве ансамбля заряженных частиц, соответствующих пучку). Радиочастотное электрическое поле обеспечивает радиальную локализацию заряженных частиц на этапе, когда снижение кинетической энергии заряженных частиц еще не произошло, даже при относительно больших кинетических энергиях, и "поджимает" частицы к оси по мере потери ими кинетической энергии.

Описанные линейные газонаполненные мультипольные транспортирующие устройства часто используются одновременно и как ячейки для фрагментации заряженных частиц в tandemных масс-спектрометрах (например, см. патент US6093929). Направленное вдоль оси устройства постоянное электрическое поле, формируемое дополнительными электродами, может использоваться для форсирования транспортировки заряженных частиц вдоль канала транспортировки (транспортирующее устройство для ионов в патенте US5847386, ячейка для фрагментации ионов в патенте US6111250).

Если концы линейного мультипольного транспортирующего устройства заглушены барьерами из электрических полей, получается еще один тип радиочастотных устройств, используемых в масс-спектрометрии — линейная мультипольная ионная ловушка, или накопительное устройство для заряженных частиц. Такие ловушки широко используются для накопления заряженных частиц и импульсной передачи заряженных частиц в анализирующее устройство (патенты US5179278, WO02078046, US5763878, US6020586, US6507019, GB2388248 и др.). Мультипольные ловушки также часто используются для того, чтобы целенаправленно подвергнуть заряженные частицы ион-молекулярным реакциям с нейтральными частицами (патенты US6140638, US6011259), с электронами (патенты GB2372877, GB2403845, GB2403590), заряженными частицами с противо-

положным зарядом (патент US6627875), обеспечить дополнительную фрагментацию заряженных частиц за счет воздействия на заряженные частицы, например, фотонами или другими внешними физическими факторами.

С той же целью, что и мультипольная линейная ловушка, может использоваться радиочастотная ловушка Пауля или линейная радиочастотная ловушка, когда вместо последовательного резонансного выбрасывания друг за другом нужных групп ионов сразу все содержимое ловушки инжектируется в анализирующее устройство импульсом электрического напряжения (патенты WO2006/129068, US2008/0035841). Точно так же мультипольная линейная ловушка, в которой инжектирование в анализирующее устройство сделано масс-селективным, может использоваться как грубый фильтр масс, отбирающий нужные группы заряженных частиц для дальнейшего детального анализа (патент US2007/0158545).

Близкими по духу, но не по конструктивному исполнению являются транспортирующие устройства и/или накопительные устройства, использующие электроды в виде набора пластин с отверстиями, к которым приложены высокочастотные электрические напряжения со сдвигом фаз между соседними пластинами (патенты US5818055 [11], US6812453 [12], US6894286 [13]) или между частями одной пластины (патент GB2470664 [14]). В этом случае в силу симметрии электродов возникающее высокочастотное поле вблизи оси устройства практически равно нулю, в то время как при приближении к границам транспортирующего канала оно резко возрастает. Поэтому, как и в случае линейных мультипольных транспортирующих устройств, заряженные частицы будут отталкиваться от поверхностей электродов и удерживаться радиочастотным полем в ограниченном объеме, окружающем ось устройства, а по мере снижения кинетической энергии в результате столкновения с молекулами газа заряженные частицы будут группироваться вблизи оси устройства.

Для таких устройств (см., например, патенты US5818055 [11] и US6894286 [13]) в силу специфики приложенных высокочастотных потенциалов и в силу симметрии электродов в окрестности оси устройства силы, способствующие перемещению заряженных частиц вдоль канала транспортировки, практически отсутствуют, если частота электрического поля слишком велика, симметрия электродов не нарушена, а дополнительные электрические поля для управления заряженными частицами не предусмотрены. Для достаточно эффективного перемещения заряженных частиц вдоль длины канала для транспортировки требуется, чтобы частота электрического поля была не слишком велика (в противном случае заряженные частицы не успевают сместиться за период осцилля-

ций электрического поля и остаются практически на одном месте, совершая лишь небольшие локальные колебания). С другой стороны, для достаточно эффективного отталкивания заряженных частиц от краев электродов и концентрации их в окрестности канала транспортировки требуется, чтобы частота электрического поля была не слишком мала (в противном случае заряженная частица преодолевает радиальное сечение устройства от края до края, раньше чем электрическое поле успевает переключиться в отталкивающую фазу). Непустой интервал частот, при котором возможно функционирование подобного устройства без внесения радикальных конструктивных изменений, существует только при относительно высоких давлениях газа [15].

Проверка с помощью численного моделирования устройств согласно патентам US5818055 [11], US6894286 [13] в диапазоне частот, при которых они оказываются работоспособными, показывает, что для этих устройств захвата заряженных частиц высокочастотной волной электрического потенциала, перемещающейся вдоль оси устройства, не происходит, частицы с разными массами и разными начальными условиями (координатами и скоростями) перемещаются вдоль канала транспортировки с разными скоростями и как результат — разбиение пучка заряженных частиц на отдельные пространственно сепарированные и синхронно перемещаемые пакеты заряженных частиц отсутствует. Приложение между соседними пластинами постоянной разницы напряжений, способствующей созданию вдоль оси устройства постоянного электрического поля по аналогии с патентами US5847386 и US6111250 решает проблему транспортировки вдоль оси устройства, но при этом выход заряженных частиц из устройства по-прежнему не является дискретным и синхронизированным во времени. Введение двух разных напряжений питания с двумя разными частотами — одно для локализации заряженных частиц вблизи оси, другое для транспортировки заряженных частиц вдоль оси — снимает проблему [15]. Практически это приводит к решению по патенту US6812453 [12], который подробно рассматривается в следующем разделе.

Наиболее удачным решением из числа имеющихся технических решений следует признать суперпозицию высокочастотного электрического поля, неоднородного по радиусу и обеспечивающего локализацию заряженных частиц в окрестности оси устройства по радиальному направлению, и квазистатической бегущей волны электрического поля вдоль оси устройства, обеспечивающей разбиение пучка заряженных частиц с разной массой на пространственно сепарированные пакеты и синхронную транспортировку указанных пакетов вдоль оси устройства (патенты US6812453 [12] и

GB2470664 [14]). Однако, поскольку положительно заряженные частицы группируются в окрестностях минимумов бегущей волны потенциала квазистатического электрического поля, а отрицательно заряженные частицы группируются в окрестностях максимумов бегущей волны потенциала квазистатического электрического поля, обеспечить транспортировку положительно и отрицательно заряженных частиц в едином пакете заряженных частиц по этому способу не удается.

2. УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С ПОМОЩЬЮ ВОЛНЫ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА

Устройство [12] является наиболее близким к описанному в данном цикле работ принципу управления движением заряженных частиц с помощью высокочастотных электрических полей с медленно меняющимися во времени эффективными потенциалами (хотя, конечно же, существуют и другие устройства подобного типа [11, 13–15]). Рассматриваемое устройство содержит систему электродов, представляющую собой последовательность соосных пластин с отверстиями, расположенных с образованием между электродами внутреннего объема, ориентированного вдоль продольной оси устройства и предназначенного для перемещения в нем ионов. Устройство также содержит средство электропитания, обеспечивающее приложение к электродам электрического питающего напряжения, включающего переменную высокочастотную составляющую напряжения, положительная и отрицательная фазы которого поочередно приложены к электродам, а также квазистатическую составляющую напряжения, для создания которой к электродам последовательно и поочередно прикладываются статические или квазистатические напряжения, в частности однополярные или разнополярные импульсы постоянного напряжения или же медленноменяющиеся синусоидальные напряжения.

В указанном устройстве формируется электрическое поле, напряженность которого описывается выражением

$$\mathbf{E}(x, y, z, t) = \mathbf{E}_a(x, y, z, t) + \mathbf{E}_0(x, y, z) f(t),$$

где $\mathbf{E}_a(x, y, z, t)$ — меняющееся вдоль длины канала для транспортировки заряженных частиц квазистатическое электрическое поле, зависящее от пространственных координат (x, y, z) и времени t ; $\mathbf{E}_0(x, y, z)$ — стационарная во времени и неоднородная по крайней мере в радиальном направлении амплитуда высокочастотного электрического поля, зависящая от пространственных координат

(x, y, z) ; $f(t) = \cos(\omega t + \varphi)$ — быстроосциллирующая функция времени (в данном случае она является строго гармонической функцией, имеющей частоту ω). Квазистатичность функции $\mathbf{E}_a(x, y, z, t)$ и быстрота осцилляций функции $f(t)$ понимаются в том смысле, что за время, когда функция $f(t)$ успеет совершить достаточно много осцилляций, функция $\mathbf{E}_a(x, y, z, t)$ практически не изменится. Тем самым изменение электрического поля $\mathbf{E}(x, y, z, t)$ во времени обладает двумя масштабами времени — "быстрым временем", за которое заметным образом меняется значение функции $\mathbf{E}_0(x, y, z) f(t)$, и "медленным временем", за которое заметным образом меняется значение функции $\mathbf{E}_a(x, y, z, t)$. Однако создаваемое при этом электрическое поле никоим образом не является архимедовым (см. далее).

На рис. 1 показана последовательность одиночных круговых диафрагм, служащая основой для устройства, соответствующего патенту [12]. На рис. 2 показано распределение осевой компоненты напряженности электрического поля вдоль канала транспортировки для нескольких близко расположенных моментов времени t , $t + \delta t$, $t + 2\delta t$,

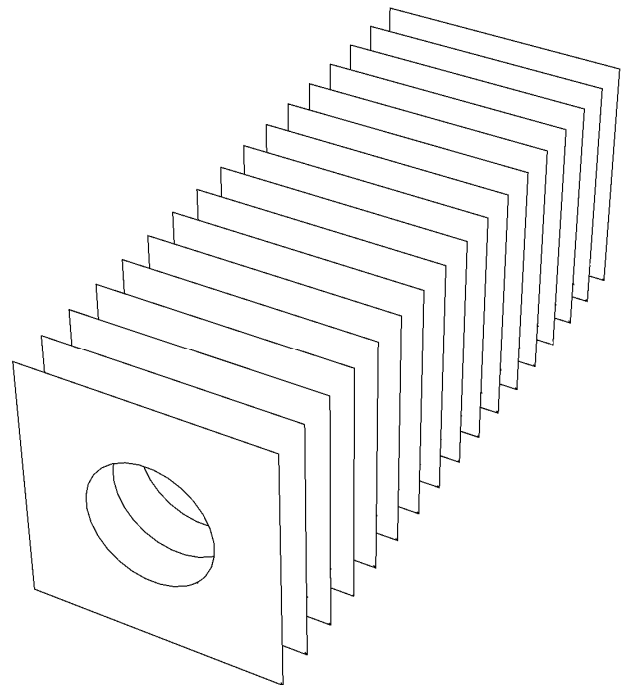


Рис. 1. Последовательность круговых диафрагм, которая может использоваться при реализации устройства для транспортировки заряженных частиц согласно патенту US6812453

$t + 3\delta t, \dots$ (т. е. в "быстром" масштабе времени) в этом устройстве. На рис. 3 показано, как меняется огибающая осевой компоненты напряженности электрического поля вдоль канала для некоторых достаточно далеко отстоящих друг от друга моментов времени t и $t + \Delta t$ (т. е. в "медленном" масштабе времени). Радиальная компонента электрического поля на оси устройства равна нулю в силу симметрии конфигурации электродов. На рис. 4 показано двумерное распределение эффективного потенциала $\bar{U}_0(x, y, z)$, соответствующего

данному высокочастотному электрическому полю, вдоль длины канала транспортировки и в радиальном направлении канала транспортировки. На рис. 5 показано двумерное распределение (в некоторый момент времени) потенциала $U_a(x, y, z, t)$ квазистатического электрического поля $\mathbf{E}_a(x, y, z, t)$. На рис. 6 показано распределение потенциала квазистатического электрического поля $\mathbf{E}_a(x, y, z, t)$ на оси канала транспортировки.

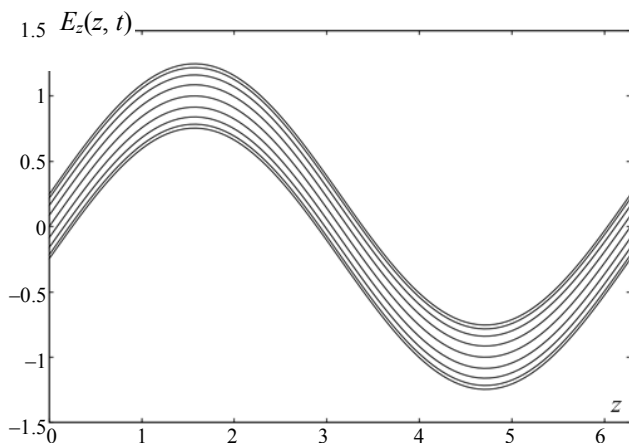


Рис. 2. Возможное распределение осевой компоненты напряженности электрического поля $E_z(z, t)$ вдоль канала для перемещения заряженных частиц для нескольких близко расположенных моментов времени $t, t + \delta t, t + 2\delta t, t + 3\delta t, \dots$ для устройства согласно патенту US6812453

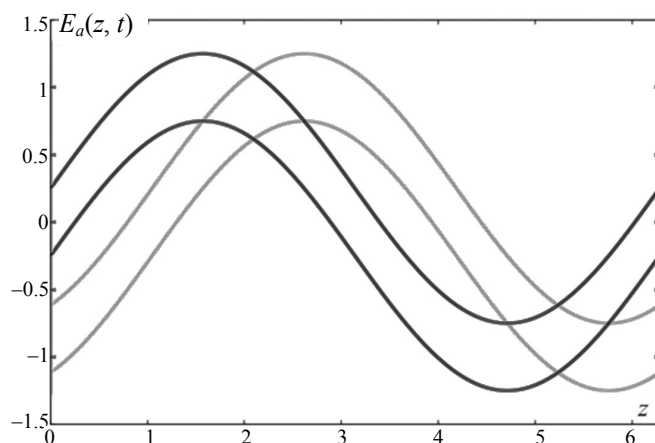


Рис. 3. Возможная огибающая осевой компоненты напряженности электрического поля $E_a(z, t)$ вдоль канала для некоторых достаточно далеко отстоящих друг от друга моментов времени t и $t + \Delta t, \Delta t \gg \delta t$ для устройства согласно патенту US6812453

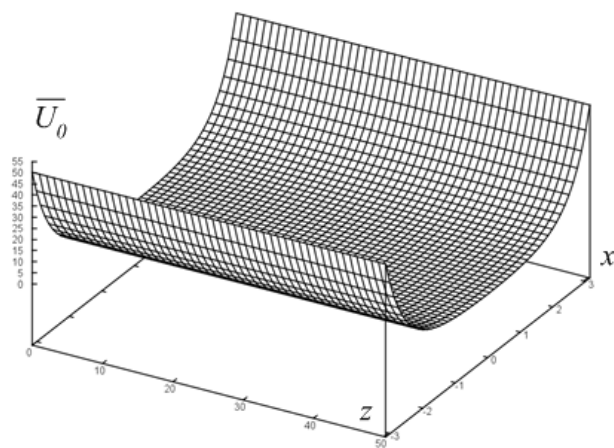


Рис. 4. Возможное двумерное распределение вдоль длины канала для перемещения заряженных частиц (ось z) и в одном из перпендикулярных направлений (ось x) псевдопотенциала $\bar{U}_0(x, y, z)$ для устройства согласно патенту US6812453

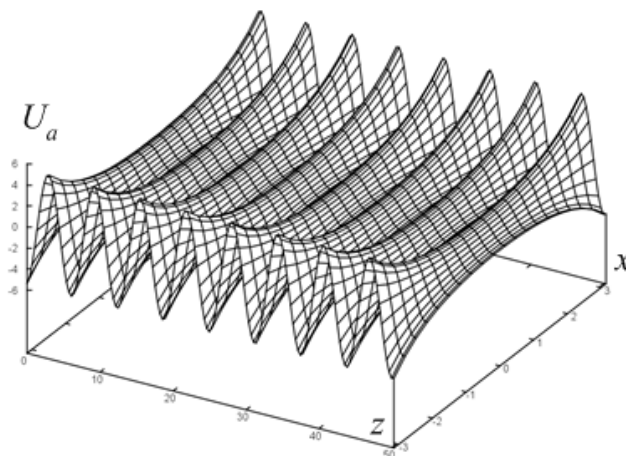


Рис. 5. Возможное двумерное распределение (в некоторый момент времени) вдоль длины канала для перемещения заряженных частиц (ось z) и в одном из перпендикулярных направлений (ось x) потенциала $U_a(x, y, z, t)$ квазистатического электрического поля для устройства согласно патенту US6812453

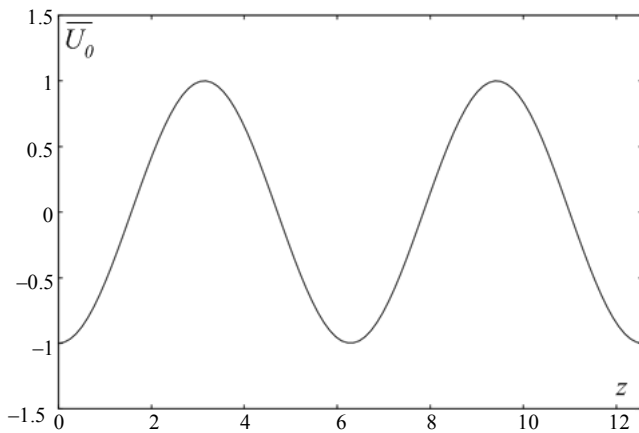


Рис. 6. Возможное распределение (в некоторый момент времени) потенциала $U_a(z, t)$ квазистатического электрического поля вдоль оси канала для перемещения заряженных частиц (ось z) для устройства согласно патенту US6812453

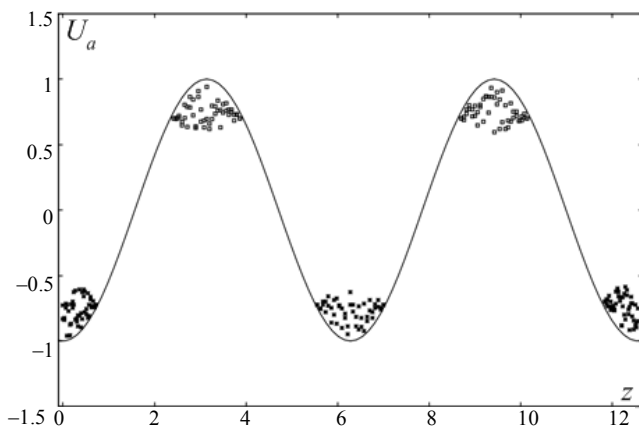


Рис. 7. Захват положительно заряженных частиц минимумами электрического квазистатического потенциала и захват отрицательно заряженных частиц максимумами электрического квазистатического потенциала в устройстве согласно патенту US6812453

На рис. 7 показан захват положительно заряженных частиц минимумами электрического квазистатического потенциала и захват отрицательно заряженных частиц максимумами электрического квазистатического потенциала и транспортировка захваченных заряженных частиц квазистатической волной потенциала от входа к выходу в данном устройстве. На рис. 8 показаны напряжения, прикладываемые к электродам устройства.

В результате действия радиочастотного поля и образования при удалении от оси устройства по радиусу барьера эффективного потенциала

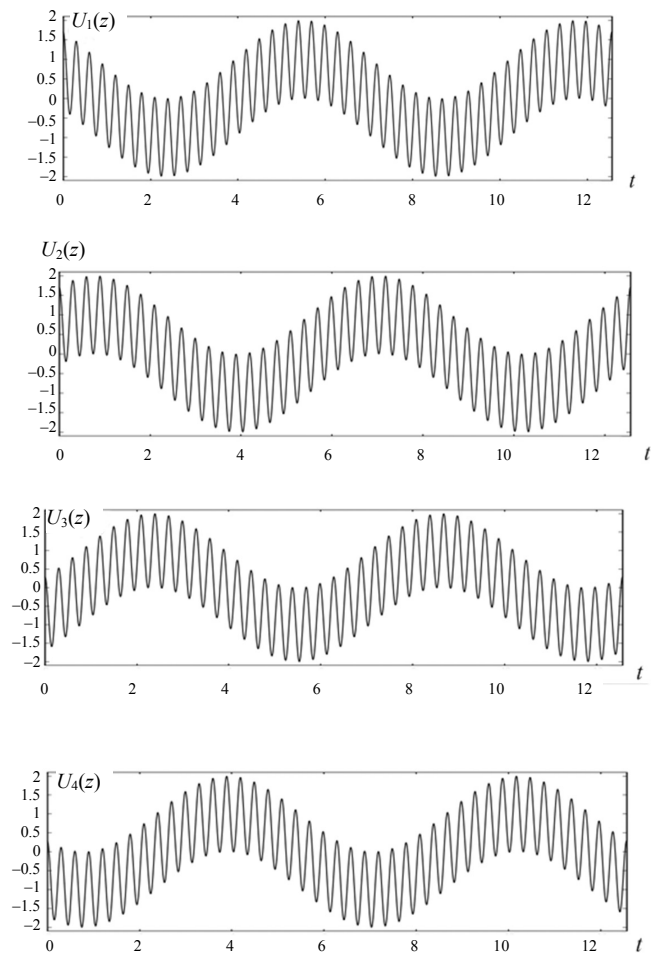


Рис. 8. Возможные электрические напряжения $U_1(t)$, $U_2(t)$, $U_3(t)$, $U_4(t)$ на первом, втором, третьем, четвертом электродах соответственно в каждой из периодически повторяющихся четверок электродов согласно патенту US6812453

$\bar{U}_0(x, y, z)$ заряженные частицы "поджимаются" к оси устройства и после затухания кинетической энергии до равновесного значения оказываются сосредоточенными в окрестности оси устройства. В силу того что вдоль оси устройства имеется распределение квазистатического электрического потенциала с чередующимися максимумами и минимумами, положительно заряженные частицы не просто концентрируются в окрестностях оси устройства, но собираются в локальных минимумах квазистатического электрического потенциала, как только их кинетическая энергия оказывается меньше локальных максимумов квазистатического электрического потенциала. Соответственно отрицательно заряженные частицы после охлаждения в результате столкновений с молекулами газа соби-

раются в локальных максимумах квазистатического электрического потенциала (на положительно заряженные частицы действует сила, направленная против градиента электрического потенциала, на отрицательно заряженные частицы — сила, направленная по градиенту электрического потенциала).

Тот факт, что на части длины оси (в частности, в окрестностях минимумов электрического потенциала для положительно заряженных частиц и в окрестностях максимумов электрического потенциала для отрицательно заряженных частиц) при удалении от оси радиальное электрическое поле квазистатического потенциала отталкивает заряженные частицы от оси устройства, не имеет особого значения, поскольку отталкивающее действие радиочастотного поля, возвращающего заряженные частицы обратно к оси устройства, перевешивает. Когда волна квазистатического потенциала $U_a(x, y, z, t)$ медленно перемещается вдоль оси устройства, она захватывает с собой заряженные частицы, сосредоточенные вблизи оси устройства в окрестностях локальных максимумов и минимумов квазистатического потенциала, заставляя частицы с разными массами и разными кинетическими энергиями перемещаться синхронно.

Численное моделирование истинного движения заряженных частиц в описываемых электрических полях подтверждает эту качественную картину движения. Для выходных устройств, работающих в импульсном режиме, данный метод разделения непрерывного потока заряженных частиц на дискретные порции представляется наиболее удачным. При правильной настройке интервалов времени между поступлением отдельных дискретных порций заряженных частиц на выход транспортирующего устройства и соответственно на вход следующего за ним устройства (которое, как правило, представляет собой масс-анализатор, работающий в импульсном режиме) и времени последующего анализа поступившей порции заряженных частиц данный способ позволяет анализировать все заряженные частицы, поступающие из непрерывного пучка в анализатор практически без потерь.

3. УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ С ПОМОЩЬЮ ВОЛНЫ ЭФФЕКТИВНОГО ПОТЕНЦИАЛА

Для сравнения возьмем устройство с архимедовым высокочастотным электрическим полем, описанное в первой работе цикла [3]. Оно может быть реализовано с помощью такой же последовательности круговых диафрагм, но с принципиально другими электрическими напряжениями, прикладываемыми к этим электродам. Поэтому поведе-

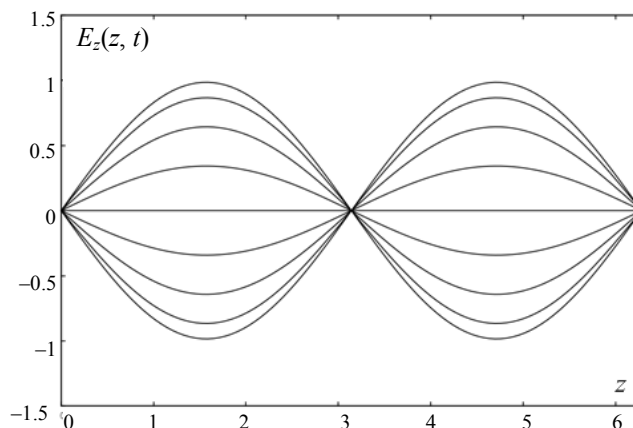


Рис. 9. Распределение осевой компоненты напряженности электрического поля $E_z(z, t)$ вдоль оси канала для перемещения заряженных частиц (ось z) для нескольких близко расположенных моментов времени $t, t + \delta t, t + 2\delta t, t + 3\delta t, \dots$ для архимедова высокочастотного поля

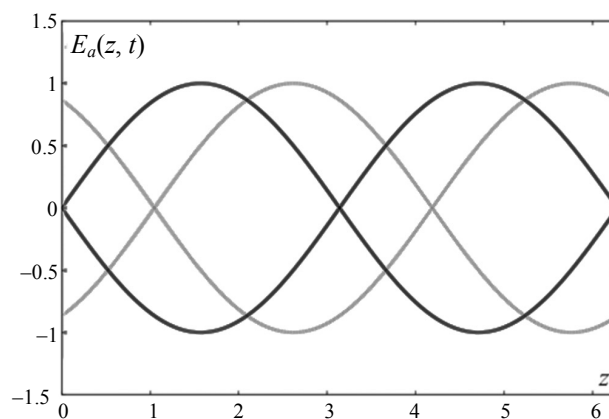


Рис. 10. Распределение огибающей осевой компоненты напряженности электрического поля $E_a(z, t)$ вдоль канала (ось z) для некоторых достаточно далеко отстоящих друг от друга моментов времени t и $t + \Delta t$ ($\Delta t \gg \delta t$) для архимедова высокочастотного поля

ние быстроосциллирующего электрического поля, неоднородного по пространству канала для перемещения заряженных частиц, а также движение заряженных частиц в указанном электрическом поле, подчиняются другим закономерностям.

В таком устройстве радиальная компонента электрического поля на оси oz тождественно равна нулю, а осевая компонента электрического поля подчиняется закону

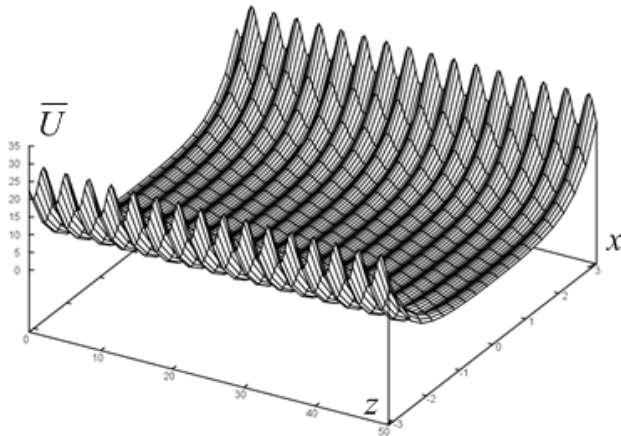


Рис. 11. Двумерное распределение вдоль длины канала для перемещения заряженных частиц (ось z) и в одном из перпендикулярных направлений (ось x) для псевдопотенциала $\bar{U}(x, y, z)$ для архимедова высокочастотного поля

$$E_z(z, t) = E_0 \cos(z/L - t/T) \cdot \cos(\omega t),$$

где L — характерный пространственный масштаб вдоль оси, T — характерный временной масштаб "медленного" времени, ω — частота осцилляций электрического поля. На рис. 9 показано распределение осевой компоненты напряженности электрического поля вдоль канала транспортировки для нескольких близко расположенных моментов времени t , $t + \delta t$, $t + 2\delta t$, $t + 3\delta t$, ... (т. е. в "быстром" масштабе времени). На рис. 10 показано, как меняется огибающая осевой компоненты напряженности электрического поля вдоль канала для некоторых достаточно далеко отстоящих друг от друга моментов времени t и $t + \Delta t$ (т. е. в "медленном" масштабе времени). На рис. 11 показан двумерный график эффективного потенциала этого высокочастотного электрического поля. Поведение эффективного потенциала вдоль оси oz описывается формулой

$$\bar{U}_*(z, t) = (E_0^2 / 8m\omega^2) (1 + \cos(2z/L - 2t/T)),$$

т. е. представляет собой медленнодвигающуюся вдоль оси oz синусоидальную волну (рис. 12). Перемещение вдоль оси устройства пакетов положительно и отрицательно заряженных частиц, захваченных минимумами эффективного потенциала, показано на рис. 13 (как уже отмечалось ранее, в отличие от устройства согласно патенту [12] в данном случае происходит захват и транспортировка в виде объединенных пакетов заряженных частиц как положительно, так и отрицательно за-

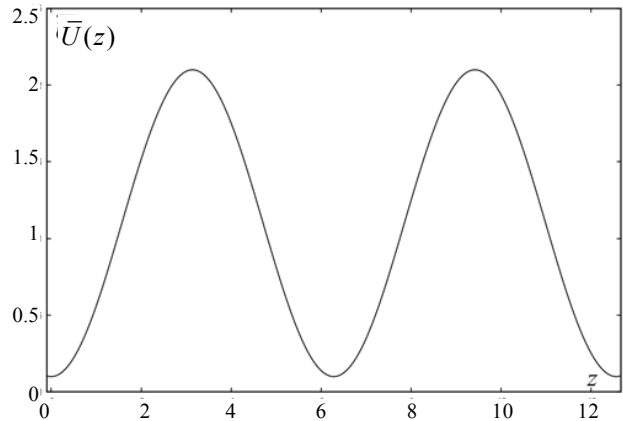


Рис. 12. Распределение псевдопотенциала $\bar{U}(z)$ вдоль канала для перемещения заряженных частиц (ось z) для архимедова высокочастотного поля

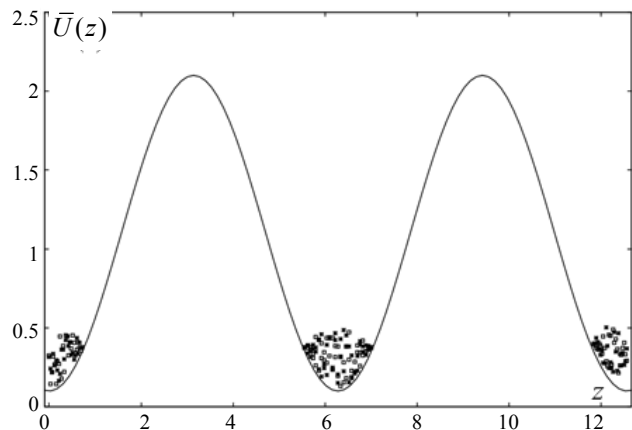


Рис. 13. Захват отрицательно и положительно заряженных частиц в местах минимумов псевдопотенциала $\bar{U}(z)$, расположенных вдоль участка оси z для архимедова высокочастотного поля

ряженных частиц). Электрические напряжения, прикладываемые к электродам, с тем чтобы создать в объеме устройства высокочастотное электрическое поле с архимедовым эффектом, приводятся на рис. 14. Тем самым существенное различие между электрическими полями, используемыми устройством согласно патенту [12], и электрическими полями, используемыми в данном методе, заключается в качественно разных законах изменения электрических полей во времени, что наглядно иллюстрируется приведенными рисунками.

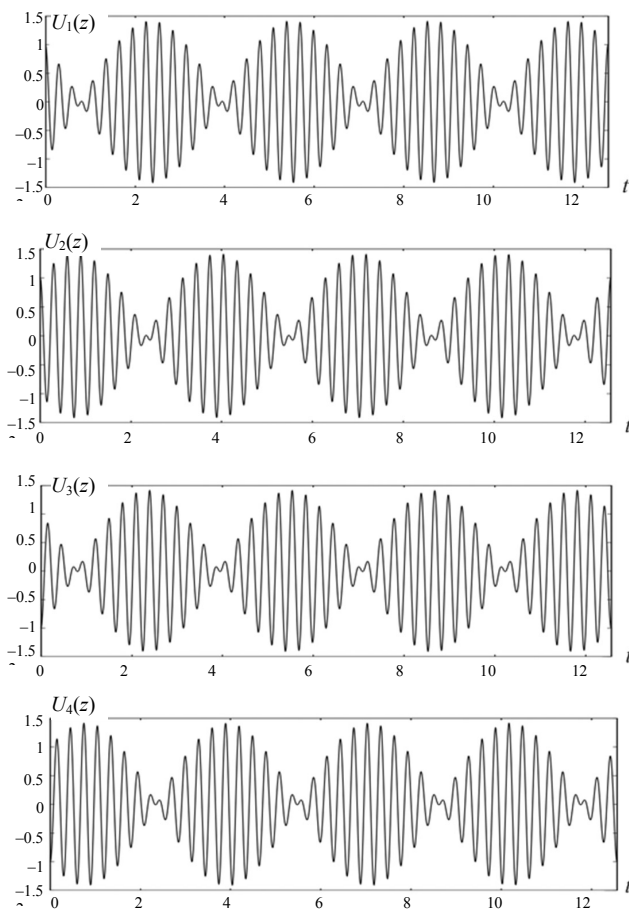


Рис. 14. Электрические напряжения, которые надо прикладывать к периодической последовательности повторяющихся четверок электродов для создания архимедова высокочастотного электрического поля с эффективным потенциалом на оси $[(1 - \cos(z/L - t/T))/2]$

Численное моделирование движения заряженных частиц в указанном высокочастотном электрическом поле подтверждает требуемые свойства такого устройства: происходит разбиение совокупности заряженных частиц на пространственно сепарированные пакеты, которые затем синхронно транспортируются вдоль канала транспортировки в соответствии с перемещением минимумов эффективного потенциала быстроосциллирующего электрического поля. Указанная картина происходит как при транспортировке заряженных частиц в вакууме, так и при транспортировке заряженных частиц в разреженном газе, когда рассеяние заряженных частиц при столкновениях с молекулами нейтрального газа моделируется методом Монте-Карло. Отличие транспортировки в вакууме от транспортировки в разреженном газе состоит в том, что при транспортировке в газе заряженные

частицы, изначально оказавшиеся вне области устойчивости (области захвата), все-таки оказываются захваченными одной из последующих областей захвата, тогда как при транспортировке в вакууме движение теряет устойчивость, частицы раскачиваются высокочастотным полем и рано или поздно гибнут на электродах или вылетают из канала транспортировки.

4. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ НОВОГО СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Высокочастотное электрическое поле с синусоидальной волной псевдопотенциала, использованное в качестве примера практической системы в первой работе данного цикла работ [3], далеко не единственное высокочастотное поле с архимедовыми свойствами. Соответственно продемонстрированное там же использование такого поля для разбиения заряженных частиц на одинаковые пространственно сепарированные пакеты с последующей равномерной транспортировкой полученных пакетов заряженных частиц от входа устройства к выходу устройства — далеко не единственная возможность управлять поведением заряженных частиц с помощью подобных высокочастотных электрических полей.

Так, если вместо осевого высокочастотного электрического поля, меняющегося по закону $E_z(z, t) = E_0 \cos(z/L - t/T) \cdot \cos(\omega t)$, мы синтезируем высокочастотное электрическое поле, осевая компонента которого меняется по закону $E_z(z, t) = E_0 \cos(z/L - g(t)) \cdot \cos(\omega t)$, где $g(t)$ — заданная квазистатическая функция времени, медленно меняющаяся во времени по сравнению с функцией ωt , то тем самым вместо равномерной транспортировки мы обеспечим перемещение центров пакетов заряженных частиц по закону $z_k(t) = L \cdot g(t) - \pi L(k + 1/2)$ вдоль канала транспортировки вместо равномерного перемещения. Тем самым, в частности, мы получим возможность переправлять заряженные частицы на вход последующего устройства в заданные моменты времени, синхронизированные во времени с импульсным режимом функционирования выходного устройства, если это необходимо.

Если вместо функции z/L мы используем в этой формуле любую другую функцию $h(z)$, мы получаем возможность управлять положением центров пакетов заряженных частиц в процессе транспортировки и, например, целенаправленно сгущать и/или разрежать их вдоль канала транспортировки на определенных участках в определенные моменты времени.

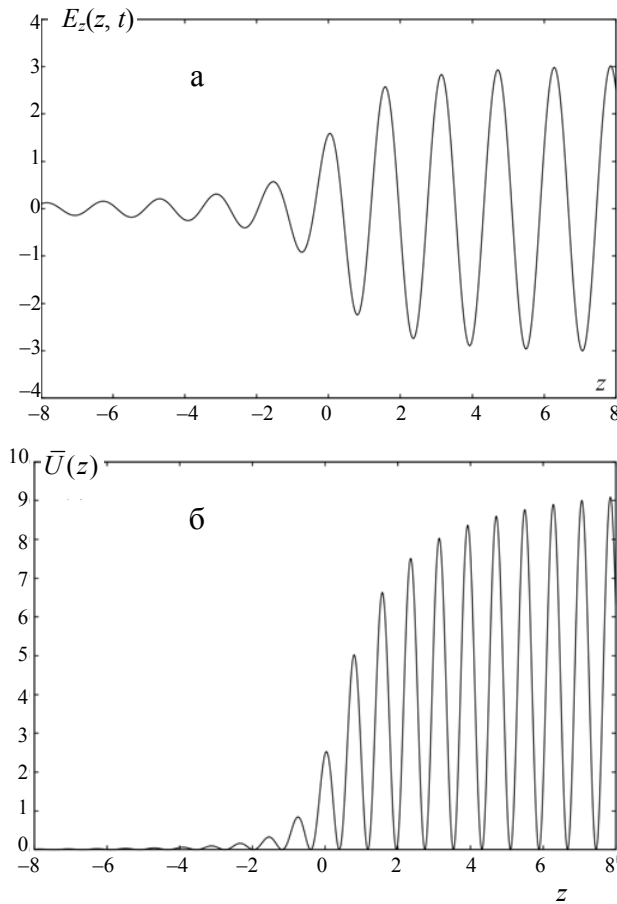


Рис. 15. Мгновенный снимок (а) напряженности высокочастотного электрического поля с осевой компонентой $E_z(z, t) = E_0(\pi/2 + \arctan(z/H)) \cos(z/L - t/T) \times \cos(\omega t)$ (где $H \gg L$ и $\omega T \gg 1$) и распределение (б) вдоль канала для перемещения заряженных частиц его псевдопотенциала $\bar{U}(z)$

Функция $g(t)$, указанная ранее, не обязательно должна быть монотонной функцией времени. Если она имеет осциллирующий характер, то перемещение пакетов заряженных частиц вдоль канала транспортировки будет иметь осциллирующий характер. В частности, это можно использовать, чтобы организовать циклическое перемещение пакетов заряженных частиц от входа к выходу и обратно, создав тем самым ловушку для заряженных частиц или накопительный объем для целенаправленного манипулирования заряженными частицами.

Дополнительные возможности по манипулированию заряженными частицами на основе указанного общего принципа предоставляет целенаправленное конструирование таких высокочастотных электрических полей, у которых значения эффективного потенциала в точках минимума и макси-

муму удовлетворяют определенным дополнительным требованиям. Рассмотрим, например, устройство, в котором осевая компонента высокочастотного электрического поля сконструирована в соответствии с формулой

$$E_z(z, t) = E_0 \left(\pi/2 + \arctan(z/H) \right) \times \cos(z/L - t/T) \cdot \cos(\omega t),$$

где $H \gg L$ и $\omega \gg 1/T$, как показано на рис. 15, а. Тогда при $-\infty < z < -2H$ амплитуда высокочастотного электрического поля будет практически равна нулю, а крайне малые локальные максимумы и минимумы его эффективного потенциала, показанного на рис. 15, б, не будут оказывать воздействия на перемещение заряженных частиц вдоль оси. Тем самым при $-\infty < z < -2H$ мы будем иметь область накопления заряженных частиц вместо области транспортировки заряженных частиц. Однако по мере приближения к точке $z = 0$ можно наблюдать монотонно нарастающие максимумы эффективного потенциала, образующие уходящую в сторону $z = +\infty$ нарастающую и перемещающуюся вдоль оси волну. Тем самым данное осевое распределение электрического поля формирует область устойчивого накопления частиц при $-\infty < z < -2H$, область устойчивого перемещения заряженных частиц при $+2H < z < +\infty$ и переходную область при $-2H < z < +2H$. Такая структура обеспечивает "откачку" заряженных частиц из накопительного устройства и последовательное перемещение их к выходу из устройства в виде набора пространственно сепарированных и синхронизированных во времени пакетов заряженных частиц. (На рис. 16, е, показана система электродов, которая может использоваться для создания требуемого электрического поля).

Динамическое понижение в какой-то момент времени в процессе транспортировки заряженных частиц амплитуды эффективного потенциала в точке максимума эффективного потенциала, разделяющей два соседних минимума эффективного потенциала, предоставляет новые дополнительные возможности по целенаправленному манипулированию заряженными частицами. При такой операции становится возможным объединение содержимого двух соседних пакетов заряженных частиц в один пакет заряженных частиц. При этом в зависимости от уровня, до которого понижается максимум эффективного потенциала, возможно как полное объединение соседних пакетов заряженных частиц, так и частичный переход заряженных частиц из одного пакета в другой. В частности, с учетом того, что одно и то же распределение высокочастотного поля порождает для разных масс разные эффективные потенциалы с разной высотой барьера, можно сделать обмен заряженными

частицами между соседними пакетами масс-селективным.

Вместо изменения значения эффективного потенциала в точке максимума или параллельно с изменением значения эффективного потенциала в точке максимума можно целенаправленно изменять значение эффективного потенциала в точке минимума. При повышении значения выбранного минимума эффективного потенциала выше некоторого порога можно избирательно разрушать отдельные пакеты заряженных частиц. По той же схеме можно "переливать" содержимое пакета заряженных частиц в соседний пакет заряженных частиц за счет синхронизированного понижения максимума эффективного потенциала, расположенного между двумя минимумами эффективного потенциала, и повышения одного из двух минимумов эффективного потенциала. После этого, проведя указанный процесс в обратной последовательности, можно восстановить использованную область захвата заряженных частиц в прежней форме, но уже без заряженных частиц внутри нее. В силу того что значение эффективного потенциала зависит от массы заряженной частицы и для различных частиц является разным, этот процесс можно сделать масс-селективным.

Для надежного радиального удержания заряженных частиц в окрестности канала транспортировки базового высокочастотного электрического поля, характеризуемого медленноменяющимся эффективным потенциалом с экстремумом или экстремумами, перемещающимися вдоль канала транспортировки, может быть недостаточно. Для обеспечения надежного радиального удержания заряженных частиц может использоваться дополнительное высокочастотное или импульсное электрическое поле, эффективный потенциал которого не имеет экстремума или экстремумов, перемещающихся вдоль канала транспортировки, но который формирует радиочастотный барьер для заряженных частиц при их удалении от оси устройства при приближении к электродам. В случае если надо временно или постоянно заблокировать выход заряженных частиц через конец или концы канала транспортировки заряженных частиц, указанные высокочастотные электрические поля и создаваемые ими радиочастотные барьеры могут быть локализованы на оси канала транспортировки около соответствующего конца или концов канала транспортировки.

Вместо высокочастотных электрических полей для той же цели могут использоваться статические или квазистатические электрические поля. Так, радиальное удержание пучка можно обеспечить системой периодических электростатических линз, а блокировку выхода заряженных частиц через конец или концы транспортирующего устройства можно обеспечить дополнительным потенци-

альным барьером, обеспечиваемым приложением к концевым электродам канала транспортировки постоянного напряжения.

Как дополнительные высокочастотные или импульсные электрические поля, так и дополнительные статические или квазистатические поля могут использоваться в устройстве для манипулирования заряженными частицами для других целей, отличных от улучшения радиального удержания заряженных частиц и/или блокировки выхода заряженных частиц через концы канала транспортировки. К ним относятся:

а) улучшение пространственной изоляции отдельных пакетов заряженных частиц друг от друга;

б) улучшение временной синхронизации перемещения пакетов заряженных частиц вдоль канала транспортировки, и/или временной синхронизации выхода пакетов заряженных частиц из устройства, и/или временной синхронизации загрузки заряженных частиц в устройство;

в) дополнительное управление транспортировкой заряженных частиц в устройстве.

Частным случаем дополнительного управления транспортировкой заряженных частиц является создание локальных потенциальных барьеров и/или локальных потенциальных ям на пути транспортировки заряженных частиц. Указанные потенциальные барьеры и/или ямы могут создаваться как высокочастотными электрическими полями, так и статическими и/или квазистатическими электрическими полями. Высокочастотные барьеры и/или ямы могут использоваться, в частности, для привнесения масс-селективных эффектов в процесс транспортировки заряженных частиц. Статические и квазистатические барьеры и/или ямы могут использоваться, в частности, для отделения положительно заряженных частиц от отрицательно заряженных частиц. Потенциальные барьеры и/или ямы как одного, так и другого типа могут использоваться для блокировки и/или разблокировки переноса заряженных частиц, изменения кинетической энергии заряженных частиц и др. Указанные потенциальные барьеры и/или ямы могут существовать постоянно, включаться и/или выключаться на определенном интервале или в определенные моменты времени, изменять свои параметры (высоту и/или глубину), перемещаться вдоль канала транспортировки или вдоль части длины канала транспортировки.

Частным случаем дополнительного управления транспортировкой заряженных частиц является создание локальных зон устойчивости и/или локальных зон неустойчивости движения заряженных частиц вдоль длины канала транспортировки. Указанные локальные зоны устойчивости и/или локальные зоны неустойчивости движения могут существовать постоянно, включаться и/или вы-

ключаться на определенном интервале или в определенные моменты времени, изменять свои параметры (высоту и/или глубину), перемещаться

вдоль канала транспортировки или вдоль части длины канала транспортировки.

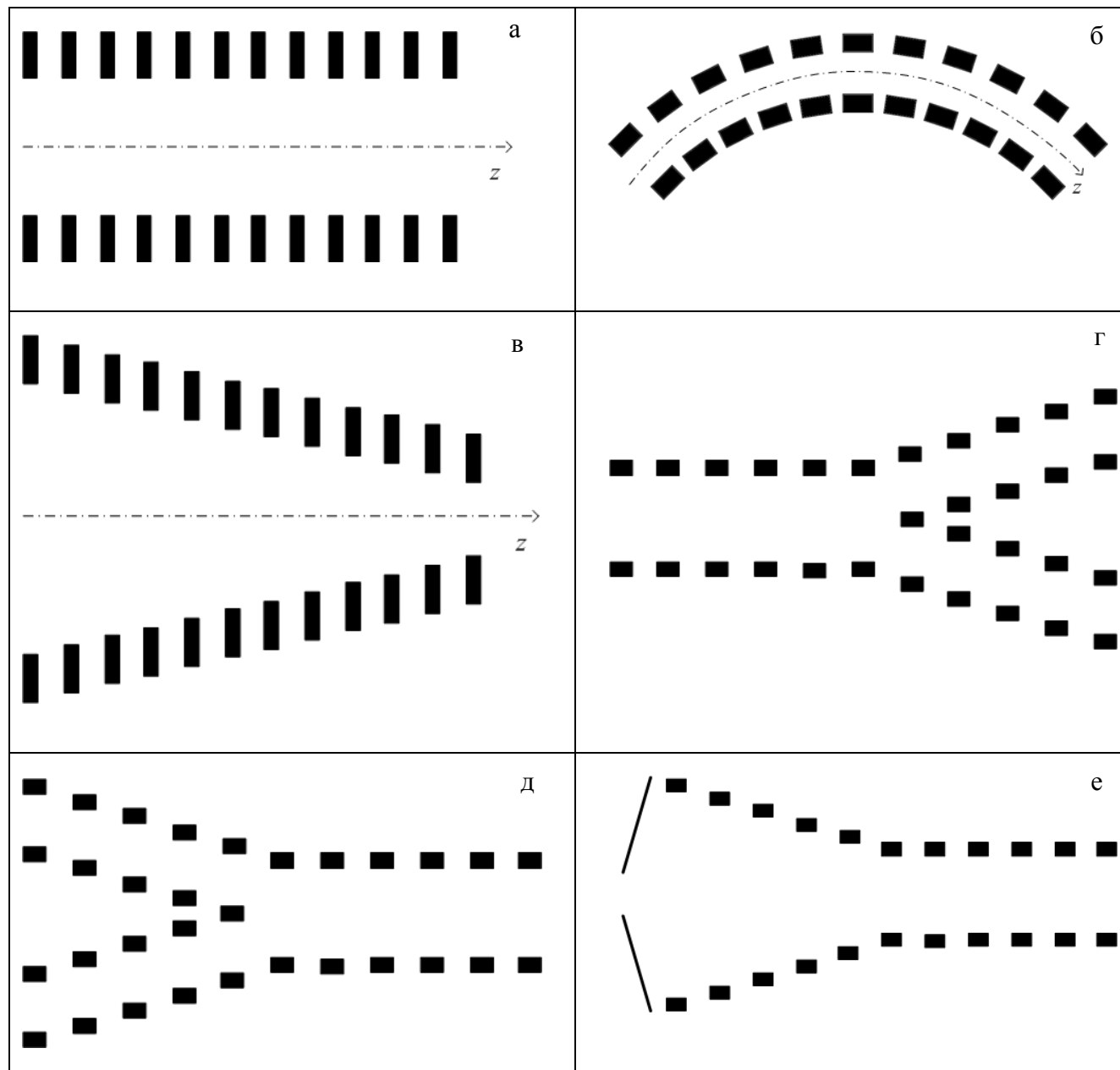


Рис. 16. Структуры электродов, способные обеспечить поля для требуемого перемещения заряженных частиц и дополнительных функций.

а — пример прямолинейного канала для перемещения заряженных частиц; б — пример криволинейного канала для перемещения заряженных частиц; в — частный случай переменного профиля канала для перемещения заряженных частиц, имеющий конфигурацию воронки; г — пример канала для перемещения заряженных частиц с расщеплением на несколько параллельных каналов, в данном случае каждый канал может быть настроен на транспортировку вполне определенного диапазона масс, "зачерпываемых" из общего канала транспортировки; д — пример слияния нескольких каналов для перемещения заряженных частиц в один канал, в данном случае может быть осуществлено динамическое переключение между разными источниками заряженных частиц и/или смешивание разных потоков заряженных частиц в один поток заряженных частиц; е — структура электродов, способная обеспечить поле, сопрягающее накопительную область с регулярной откачкой с ее края дискретных пакетов заряженных частиц

Например, суперпозиция статического или квазистатического поля и высокочастотного поля, как это происходит в квадрупольных масс-фильтрах, позволяет создавать отдельные зоны, через которые могут транспортироваться только те частицы, которые имеют заданный контролируемый диапазон масс. Другой способ управлять устойчивостью движения и, в частности перестраивать окно масс, соответствующих устойчивому движению заряженных частиц, состоит в перестройке несущей частоты высокочастотного напряжения и/или приложении дополнительных высокочастотных напряжений с кратными частотами (что соответствует в теории квадрупольных радиочастотных масс-фильтров и ионных ловушек переходу от уравнения Маттьё к более общему уравнению Хилла, предоставляющему более широкие возможности по конфигурации зон устойчивости).

Приложение к локальным медленно перемещающимся вдоль оси областям захвата заряженных частиц, сосредоточенных вокруг минимумов эффективного потенциала, резонансных раскачивающих высокочастотных напряжений позволяет осуществлять селективную экстракцию заряженных частиц определенной массы, как это происходит в ионных радиочастотных ловушках, а также осуществлять другие операции по селективному управлению ансамблем заряженных частиц, хорошо разработанных в масс-спектрометрии ионных радиочастотных ловушек. Достоинством этих операций, осуществляемых над локальными областями захвата, а не над отдельным устройством типа ионной радиочастотной ловушки, является то, что эти достаточно времяемкие операции не вызывают в данном случае специальных пауз в работе источника ионов и анализирующего ионы устройства. Действительно, указанные операции лишь замедляют время, требуемое для транспортировки конкретной группы частиц от входа к выходу, поскольку во время выполнения операций над локальной зоной захвата новые пакеты заряженных частиц продолжают загружаться в устройство для транспортировки заряженных частиц, и уже обработанные пакеты заряженных частиц поступают в анализирующее устройство.

Канал для транспортировки заряженных частиц может быть как прямолинейным, так и криволинейным (рис. 16, а и б). Профиль сечения канала транспортировки может меняться по длине канала. Частным случаем переменного профиля является профиль канала для транспортировки, который имеет конфигурацию воронки и осуществляет сжатие потока заряженных частиц в процессе транспортировки (см. рис. 16, в). Канал для транспортировки может разбиваться на несколько параллельных каналов (см. рис. 16 г), например, когда каждый канал настроен на транспортировку

вполне определенного диапазона масс, "зачерпываемых" из общего канала транспортировки. Нескольких параллельных каналов для перемещения заряженных частиц могут объединяться в единый канал для перемещения заряженных частиц (см. рис. 16, д), например, если надо осуществлять динамическое переключение между разными источниками заряженных частиц и/или смешивание разных потоков заряженных частиц в один поток заряженных частиц. Канал для транспортировки может содержать в своем составе область, выполняющую функцию накопительного объема для заряженных частиц (см. рис. 16, е).

Канал для транспортировки может быть замкнут в кольцо постоянно или на каком-то интервале времени, или устройство может осуществлять двунаправленные циклические перемещения заряженных частиц от входа к выходу и обратно постоянно или на каком-то интервале времени (в этих случаях образуется ионная ловушка, и/или накопительное устройство, и/или выделенный объем для манипулирования заряженными частицами). Канал для транспортировки может быть разбит на отдельные сегменты, в каждом из которых транспортировка заряженных частиц отличается своей спецификой. Канал для транспортировки может представлять собой последовательность каналов для транспортировки, разделенных переходными областями и/или устройствами. Канал транспортировки может начинаться в области с относительно высоким давлением газа и заканчиваться в области, находящейся практически в вакууме, проходя через одну или несколько областей дифференциальной откачки газа.

При попеременно-двунаправленной транспортировке заряженных частиц или в случае, когда заряженные частицы используются и/или анализируются непосредственно в канале транспортировки, один или оба конца у канала транспортировки могут быть заглушены. Заглушка может иметь вид постоянной конструктивной особенности или управляться электрическим полем. Для отражения заряженных частиц в обратном направлении и для создания задержки, необходимой для перестройки управляющих напряжений для транспортировки заряженных частиц в обратном направлении, заглушка может иметь вид электронно-оптического зеркала, использующего как статические или квазистатические электрические поля, так и высокочастотные электрические поля.

Для ввода заряженных частиц в канал для транспортировки заряженных частиц может иметься устройство для ввода заряженных частиц, работающее в непрерывном режиме, или в импульсном режиме, или обладающее способностью переключаться между импульсным и непрерывным режимами работы. Для вывода заряженных

частиц из канала для транспортировки заряженных частиц может иметься устройство для вывода заряженных частиц, работающее в непрерывном режиме, или в импульсном режиме, или обладающее способностью переключаться между импульсным режимом и непрерывным режимом работы. Для генерирования заряженных частиц непосредственно в канале для транспортировки заряженных частиц может иметься устройство для генерирования заряженных частиц, работающее в непрерывном режиме, или в импульсном режиме, или обладающее способностью переключаться между импульсным режимом и непрерывным режимом работы. В частности, для генерирования заряженных частиц непосредственно в канале для транспортировки заряженных частиц может использоваться процесс фрагментации первичных заряженных частиц, процесс образования вторичных заряженных частиц в результате взаимодействия с нейтральными или противоположно заряженными частицами, ионизация заряженных частиц с помощью того или иного процесса ионизации.

Устройство может использоваться как для транспортировки и манипулирования заряженными частицами в вакууме, так и в нейтральном или частично ионизированном газе. Важным случаем является, когда транспортировка заряженных частиц осуществляется в потоке газа, поскольку этот случай соответствует интерфейсу между газонаполненным источником ионов и анализирующим устройством, функционирующим в условиях вакуума. Для ввода и/или вывода из устройства заряженных частиц некоторые электроды могут иметь дополнительные отверстия или щели. Ввод и/или вывод из устройства заряженных частиц может осуществляться также через промежутки между электродами. Для ввода и/или вывода заряженных частиц из устройства могут требоваться дополнительные импульсные или ступенчатые напряжения, не связанные непосредственно с транспортировкой заряженных частиц внутри устройства.

Для создания в объеме канала транспортировки заряженных частиц требуемого высокочастотного электрического поля могут использоваться конфигурации электродов разных типов. Использованная ранее конфигурация из круговых диафрагм не является ни единственной, ни оптимальной конфигурацией электродов. В частности, диафрагма может быть квадратной, прямоугольной, многоугольной, состоять из нескольких несвязных частей с независимым электропитанием и т. д., а также менять свою форму по мере перемещения вдоль последовательности диафрагм, как это происходит, например, в скрещенных линзах [16], вызывая тем самым синхронное изменение формы сечения пакетов заряженных частиц в процессе их транспортировки.

На рис. 17 показана квадрупольно-подобная

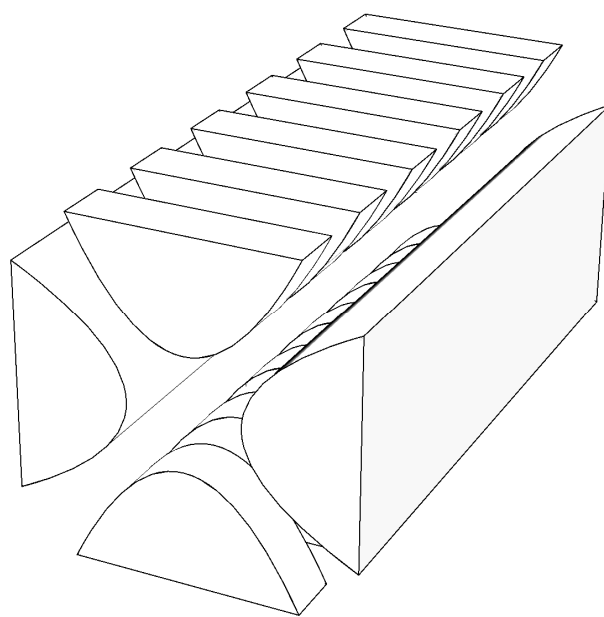


Рис. 17. Квадрупольно-подобная конфигурация электродов, используемая для конструирования канала для перемещения заряженных частиц



Рис. 18. Пример разрезных электродов (дисков), имеющих круговые сечения и служащих для создания в канале для перемещения заряженных частиц высокочастотного электрического поля с требуемым распределением псевдопотенциала вдоль оси устройства, содержащего высшие мультипольные компоненты

конфигурация диафрагм, рассчитанная аналитически для более эффективного прижатия заряжен-

ных частиц к оси устройства (в случае круговых диафрагм для достижения того же самого эффекта требуется прикладывать дополнительное радиочастотное напряжение, отталкивающее заряженные частицы от краев диафрагм к оси устройства). Еще одним специальным свойством этой диафрагмы является то, что в данном случае только к части электродов (набор разрезных сегментов) надо прикладывать высокочастотные напряжения, тогда как к остальным (два сплошных электрода) прикладывается постоянное нулевое напряжение.

Отметим также, что в данном случае профили электродов уже не являются гиперболой или алгебраическими кривыми конечного порядка, соответствующими квадратичному электрическому полю или мультипольному электрическому полю, — их точное уравнение описывается высшими трансцендентными функциями. При этом профиль электродов может иметь огрубленную форму, вплоть до замены круговыми или плоскими электродами, без заметного ухудшения транспортирующих свойств создаваемого высокочастотного электрического поля — конечно, после надлежащей корректировки положения и формы электродов с целью оптимизации деформированной области захвата заряженных частиц. Например, на рис. 18 показана система электродов, составленная из отдельных дисков (разрезных круговых электродов), которая служит для создания в канале транспортировки высокочастотного электрического поля, состоящего из высших мультипольных компонент.

Конструктивно электроды устройства могут быть выполнены в виде объемных тел, тонких сплошных поверхностей, представлять из себя проводящие слои металла, нанесенные на диэлектрическую подложку, иметь вид сеток. Сеточные электроды являются удобными, когда транспортировка заряженных частиц осуществляется в потоке газа и требуется обеспечить конфигурацию электродов, оказывающих потоку газа минимальное сопротивление.

В качестве очевидного приложения подобные устройства могут служить эффективным инструментом для преобразования непрерывного ионного пучка в серию синхронизированных во времени ионных импульсов и тем самым использоваться как источник ионов (система подготовки ионов). Свойство данного способа транспортировки заряженных частиц обеспечивать заданный закон времени перемещения и выхода пакетов заряженных частиц оказывается неопределимым при использовании его для стыковки с различными выходными устройствами, работающими в импульсном режиме. При стыковке с таким устройством необходимо обеспечить, чтобы интервалы времени между последовательными пакетами заряженных частиц были больше интервалов времени, требуемых вы-

ходному устройству для обработки очередного пакета, чтобы не происходило потерь заряженных частиц. В качестве выходного устройства может использоваться устройство, которое осуществляет анализ заряженных частиц (например, времяпролетный масс-спектрометр, оптический спектрометр, спектрометр ионной подвижности, радиочастотная ловушка) или выполняет целенаправленную модификацию пакета заряженных частиц (например, столкновительная ячейка или ион-молекулярный реактор), или отбирает подгруппу заряженных частиц с нужными характеристиками (например, фильтр масс, фильтр ионной подвижности или дифференциальной ионной подвижности и др.), или передает пакет заряженных частиц другому устройству (например, другое устройство для транспортировки заряженных частиц), или генерирует импульс заряженных частиц для каких-либо технических приложений (например, бомбардировки поверхности твердого тела или образца с пробой вещества), или объединяет в себе сразу несколько функций.

Данный метод управления заряженными частицами очевидным образом является эффективным способом преобразования непрерывного пучка заряженных частиц в серию последовательных импульсов заряженных частиц, т. к. при соответствующем подборе скорости передвижения пакетов заряженных частиц вдоль оси устройства для транспортировки заряженных частиц и соответственно частоты повторения импульсов выстреливающих напряжений возможен анализ всех поступающих заряженных частиц без потерь. Парным к нему может быть применение указанного способа транспортировки заряженных частиц, для того чтобы превращать ионы, генерируемые на входе устройства или поступающие на вход устройства в существенно импульсном режиме, в квазинепрерывный поток дискретных пакетов охлажденных заряженных частиц на выходе устройства. Дополнительные возможности обеспечиваются, если процесс транспортировки заряженных частиц сочетается с воздействием на заряженные частицы, находящиеся в локальных областях захвата, с помощью дополнительных физических приемов. Тем самым осуществляется дополнительное целенаправленное преобразование заряженных частиц, поступающих на вход, в те же самые или другие заряженные частицы с теми же самыми или с новыми параметрами, получаемые на выходе.

В настоящий момент по результатам данного исследования поданы патентные заявки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архимедов винт // Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона. СПб., 1890–1907. URL:

- (http://ru.wikisource.org/wiki/ЭСБЕ/Архимедов_винт).
2. Архимедов винт // Политехнический словарь / Гл. ред. А.Ю. Ишлинский. М.: Советская энциклопедия, 1989.
 3. Бердников А.С. // Научное приборостроение. 2011. Т. 21, № 2. С. 77–89.
 4. March R.E., Todd J.F.J. Quadrupole ion trap mass spectrometry. 2nd edition. Wiley-InterScience, 2005. 346 p.
 5. Major F.J., Gheorghe V.N., Werth G. Charged particle traps. Springer, 2005. 354 p.
 6. Werth G., Gheorghe V.N., Major F.J. Charged particle traps II. Springer, 2009. 275 p.
 7. Мак-Лахлан Н.В. Теория и приложения функций Матъё. М.: Изд-во иностранной литературы, 1953. 476 с.
 8. Абрамовиц М. и Стиган И. Справочник по специальным функциям. М.: Наука, 1979. 832 с.
 9. Уиттекер Э.Т., Ватсон Дж.Н. Курс современного анализа. Ч. 2. М.: Физматгиз, 1963. 516 с.
 10. Якубович В.А., Старжинский В.М. Линейные дифференциальные уравнения с периодическими коэффициентами и их приложения. М.: Наука, 1972. 718 с.
 11. Franzen J. Method and device for injection of ions into an ion trap. Patent US005818055. 1998.
 12. Bateman R.H., Giles K., Pringle S. Mass spectrometer. Patent US6812453. 2004.
 13. Derrick P.J., Colburn A.W., Giannakopoulos A. Ion focusing and conveying device and a method of focusing and conveying ions. Patent US6894286. 2005.
 14. Kenny D.J. Ion tunnel ion guide. Patent GB2470664. 2010.
 15. Colburn A.W., Barrow M.P., Gill M.C., Giannakopoulos A.E., Derrick P.J. Electrospray ionization source incorporating electrodynamic ion focusing and conveying // Physics Procedia. 2008. V. 1, N 1. P. 51–60.
 16. Баранова Л.А., Явор С.Я. Электростатические электронные линзы. М.: Наука, 1986. 192 с.

*Институт аналитического приборостроения РАН,
г. Санкт-Петербург*

Контакты: Бердников Александр Сергеевич,
asberd@yandex.ru

Материал поступил в редакцию 20.04.2011.

TIME-DEPENDENT PSEUDOPOTENTIAL AND ITS APPLICATION FOR THE DESCRIPTION OF THE CHARGED PARTICLES AVERAGED MOTION. PART 4. DEVICES AND INSTRUMENTS

A. S. Berdnikov

Institute for Analytical Instrumentation of RAS, Saint-Petersburg

The series of publications describes a new method to control the movement of the charged particles by high frequency electric fields. This new class of high frequency electric fields is characterized by pseudopotentials slowly evolving in time. New class of mass spectrometric devices for transport of charged particles is suggested using the developed general theory of pseudopotentials slowly evolving in time and high frequency electric fields with Archimedean properties. The paper considers various types of mass spectrometric devices and instruments which can be developed using these high frequency electric fields as a background. Some prototypes of these mass spectrometric devices are also discussed.

Keywords: mass spectrometric devices, radio frequency devices, pseudopotentials, high frequency electric fields, radio frequency electric fields