

На правах рукописи

ГОЛОВИН АНАТОЛИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**СПЕКТРОМЕТР ИОННОЙ ПОДВИЖНОСТИ
С ИСТОЧНИКОМ ИОНИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ИМПУЛЬСНОГО
КОРОННОГО РАЗРЯДА**

05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и
систем управления

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:



Москва – 2010 г.

Диссертация выполнена на кафедре микро- и нанoeлектроники
Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Беляков Владимир Васильевич,
НИЯУ МИФИ, г. Москва

Официальные оппоненты:

Митягин Александр Юрьевич, доктор физико-математических наук,
ИРЭ РАН,

Мочкин Вячеслав Сергеевич, кандидат технических наук,
ФГУП НИИМА «Прогресс»

Ведущая организация: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», г. Москва

Защита состоится 17 мая 2010 г. в 14:00 в конференц-зале К-608
на заседании диссертационного совета Д 212.130.02 НИЯУ МИФИ
по адресу 115409, г. Москва, Каширское ш., д. 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан «___» апреля 2010 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном
экземпляре, заверенный печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Ученый секретарь
диссертационного совета
НИЯУ МИФИ, д.т.н.,
профессор



Скоробогатов П. К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы. Угроза терроризма, имеющая глобальный характер, требует от мирового сообщества, помимо принятия военных и политических мер противодействия, разработки соответствующих технических решений для предотвращения подготовки и проведения террористических актов. Особый интерес представляют задачи разработки ручных портативных переносных приборов для обследования служебных помещений и внутренних отсеков крупногабаритных передвижных объектов, а также для обнаружения следовых количеств веществ на деталях автотранспорта, личных вещах и одежде.

Устройства для обнаружения малых количеств веществ, построенные на принципе спектрометрии ионной подвижности, являются наиболее перспективными в силу наилучшего сочетания стоимости, компактности, параметров обнаружения и широкого диапазона обнаруживаемых веществ. Принцип спектрометрии ионной подвижности основан на измерении времени пролета ионом определенного расстояния в газовой среде в постоянном электрическом поле. Классическая конструкция спектрометра ионной подвижности представляет собой набор металлических электродов, формирующих область с однородным продольным электрическим полем, в сочетании с электрическим затвором и областью ионизации. Идентификация молекулы осуществляется с помощью измерения ее подвижности, прямо пропорциональной скорости дрейфа и обратно пропорциональной напряженности электрического поля.

В настоящее время принцип спектрометрии ионной подвижности применяется в ряде серийно изготавливаемых портативных приборов компаний Smiths Detection (Великобритания), GE Security (США), Implant Sciences Corp. (США) и Bruker (Германия). Однако, несмотря на очевидность физических принципов, параметры обнаружения и подходы к конструированию, выбору технических решений, технологий и схемотехнических вариантов исполнения являются коммерческой тайной, что делает актуальной задачу разработки отечественных приборов такого класса.

В большинстве портативных спектрометров ионной подвижности применяются источники ионизации на основе радиоактивных изотопов, что создает серьезные проблемы, связанные с сертификацией, эксплуатацией, транспортировкой и утилизацией. Поэтому важной задачей является разработка и внедрение нерадиоактивных источников ионизации. Применяемые в настоящее время дрейфовые трубки из массивных металлических электродов имеют значительную массу и габариты, что ограничивает возможности портативного исполнения и приводит к увеличению времени выхода на рабочий режим вследствие высокой теплоемкости. Указан-

ное ограничение обуславливает необходимость разработки нового варианта конструкции. Необходимость детектирования широкого перечня веществ, включая взрывчатые и наркотические компоненты, требует реализации системы быстрого переключения полярности детектируемых ионов. На параметры обнаружения спектрометров ионной подвижности большое влияние оказывают влажность и температура, затрудняя идентификацию веществ в реальных условиях эксплуатации, поэтому для создания стабильных условий протекания ионно-обменных реакций в области ионизации и реализации непрерывной термической очистки необходим постоянный нагрев внутренних поверхностей до 100°C - 150°C.

Таким образом, решение указанных проблем позволит создать портативный спектрометр ионной подвижности с нерадиоактивным источником ионизации, возможностью обнаружения положительных и отрицательных ионов и постоянным мониторингом условий проведения измерений, способный работать в автоматическом режиме с минимизацией контроля со стороны оператора.

Целью диссертационной работы является создание макета портативного спектрометра ионной подвижности с нерадиоактивным источником ионизации на основе импульсного коронного разряда, переключаемой полярностью детектируемых ионов и дрейфовой трубкой с малыми массогабаритными параметрами и низкой теплоемкостью.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

1. Разработать методику расчета геометрических и электрических параметров узлов формирования и транспорта ионов в дрейфовой трубке и создать программу для проведения таких вычислений.
2. Выбрать компоновку и разработать конструкцию портативного спектрометра ионной подвижности.
3. Разработать систему управления источником ионизации на основе коронного разряда, работающего в импульсном режиме, и провести эксперименты по изучению и оптимизации его работы.
4. Разработать систему формирования высокого напряжения в дрейфовой области спектрометра ионной подвижности с переключаемой полярностью для детектирования как положительных, так и отрицательных ионов. Разработать систему управления и конструкцию электростатического затвора.
5. Разработать конструкцию дрейфовой трубки спектрометра ионной подвижности, обеспечивающую малые массогабаритные параметры и низкую теплоемкость.
6. Провести экспериментальную апробацию портативного спектрометра ионной подвижности с нерадиоактивным источником ио-

низации на основе коронного разряда и показать возможность его практического применения.

Объектом реализации указанных исследований является портативный спектрометр ионной подвижности с нерадиоактивным источником ионизации на основе импульсного коронного разряда, оснащенный устройствами пробоотбора из воздушной фазы и с поверхности, системой автономного питания от аккумуляторной батареи, комплексной системой звуковой, световой и графической индикации. Управление прибором и обработка результатов осуществляется встроенным компьютером. Дрейфовая трубка спектрометра реализована с использованием современных технологий изготовления печатных плат и лазерной резки тонкого листового металла.

Достоверность результатов подтверждается воспроизводимой технологией изготовления, воспроизводимыми электрическими параметрами источника высокого напряжения, ионного источника и электростатических затворов, параметрами обнаружения и согласованностью полученных результатов с результатами других исследователей, а также практикой использования разработанных узлов спектрометра ионной подвижности в производимых мелкосерийно детекторах сверхмалых количеств веществ.

Научная новизна диссертации заключается в выборе способа реализации системы управления нерадиоактивным импульсным источником ионизации на основе коронного разряда, блока формирования высокого напряжения и электростатического затвора, а также в разработке конструкции дрейфовой трубки, состоящей из печатных плат. При этом получены следующие **научные результаты**:

1. Предложена методика расчета полей в источнике ионизации и методика расчета неоднородности электрического поля в регулярной дрейфовой структуре.
2. Сделан вывод о значительной роли ультрафиолетового излучения, сопровождающего разряд, на процесс образования ионов, позволяющий существенно упростить конструкцию области ионизации.
3. Предложен и реализован способ синхронизации нескольких источников ионизации на основе коронного разряда с использованием оптической связи.
4. Предложен и реализован способ управления напряжением, энергией, током коронного разряда на основе регулируемого импульсного источника высокого напряжения.

5. Предложен и обоснован результатами проведенных исследований способ управления электростатическими затворами, находящимися под высоким напряжением, с применением оптоэлектронной гальванической развязки.
6. Предложен и реализован способ управления источником высоковольтного напряжения с электронным переключением полярности.

Практическая значимость работы определяется следующими результатами:

1. Проведен расчет транспорта ионов в областях ионного затвора, дрейфа и коллектирования, позволивший определить геометрические и электрические параметры данных областей. В источнике ионизации реализован отражатель ионов, обеспечивающий формирование траекторий ионов для соответствия апертуре канала транспортировки в области дрейфа.
2. Реализована система управления и конструкция нерадиоактивного источника ионизации на основе импульсного коронного разряда, отличающегося возможностью образования как положительных, так и отрицательных ионов, плавным регулированием мощности ионизации и пространственно-распределенной структурой с дублированием пар электродов и синхронизацией разрядов на основе оптической связи.
3. Реализовано электронное переключение полярности высокого напряжения за время, не превышающее 10 секунд, обеспечивающее одновременное детектирование положительных и отрицательных ионов.
4. Реализована дрейфовая трубка на основе печатных плат с глубокой интеграцией систем управления, нагревательных элементов, разъемов для подключения внешних устройств и газовых вводов, имеющая массу 105 г и время выхода на рабочую температуру 100°C, не превышающее 5 минут.
5. На основе разработанных технологий и систем управления создан макет портативного спектрометра ионной подвижности с расширенной функциональностью и высокой степенью интеграции массой 2,5 кг. На прибор получен сертификат соответствия и патенты РФ на полезную модель и устройство дрейфовой трубки.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Методика расчета транспорта ионов в области ионизации, электростатическом затворе и дрейфовой области.
2. Способ конструктивной и функциональной интеграции узлов высоковольтного делителя напряжения, многозонной системы на-

- грева, коллектора ионного тока и источника ионизации на основе коронного разряда.
3. Способ организации управления и конструкция импульсного источника ионизации на основе коронного разряда с пространственно-распределенной структурой и синхронизацией разрядов на основе оптической связи.
 4. Способ управления электростатическими затворами с оптоэлектронной гальванической развязкой и источником высокого напряжения с переключаемой полярностью.
 5. Экспериментальные результаты исследования источника ионизации на основе импульсного коронного разряда.

Личный вклад автора. Общая постановка и обоснование задач исследований, обсуждение полученных результатов были выполнены автором совместно с научным руководителем и членами научного коллектива. Личный вклад автора заключается в разработке и реализации дрейфовой трубки на основе печатных плат, электронных узлов ионного затвора, источника ионизации на основе коронного разряда, проведении моделирования распределения электрических полей в областях ионизации, ионного затвора и дрейфа. Автором проведены экспериментальные исследования ионизации молекул с помощью коронного разряда, работы по повышению чувствительности с помощью изменения временных характеристик работы электростатического затвора и оптимизации скорости и направления движения газовых потоков в ионном источнике. Автором также были проведены апробация разработанного спектрометра ионной подвижности и анализ результатов.

Представленные исследования выполнялись на базе кафедры микро- и нанoeлектроники НИЯУ «МИФИ».

Апробация работы. Основные результаты работы представлялись, на 8, 9, 10, 11, 12 и 13 научных сессиях МИФИ (г. Москва, 2005; 2006; 2007; 2008; 2009; 2010), на VII Московском международном салоне инноваций и инвестиций (Москва, ВВЦ, 2007г.), на форуме «Технологии безопасности 2010» (Москва, Крокус Экспо, 2010г.).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 15 печатных работ, в том числе 11 статей (3 статьи в журнале из перечня ВАК), а также 3 патента РФ на полезную модель и 1 патент на изобретение. Список печатных работ приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложения. Общий объем диссертации составляет 196 страниц, включая 91 рисунок, 1 таблицу и 176 библиографических ссылок.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении сформулирована актуальность данной работы, поставлены цели и задачи исследований, рассмотрена новизна и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту. Представлен краткий обзор структуры диссертации.

Первая глава (литературный обзор). В первой части литературного обзора дана краткая характеристика современного состояния в области обнаружения сверхмалых количеств веществ. Рассмотрены методы поиска с помощью спектрометрии ионной подвижности, хемилюминесценции, хроматографии, масс-спектрометрии и специально обученных животных. По итогам проведенного анализа, спектрометрия ионной подвижности является предпочтительной для построения мобильных переносных детекторов в силу потенциальной достижимости требуемых массогабаритных параметров в этой технологии, универсальности в обнаружении веществ различных классов, высокой чувствительности и селективности.

Во второй части литературного обзора приведено описание типовой конструкции спектрометра ионной подвижности (рис.1). Проведен анализ параметров компактных спектрометров ионной подвижности зарубежного и отечественного производства, отмечены их достоинства и недостатки.

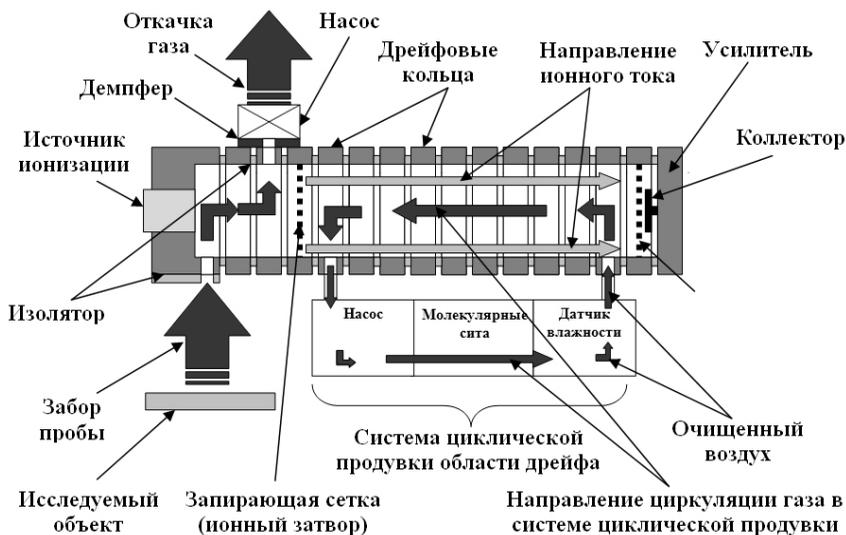


Рис. 1. Типовая структура спектрометра ионной подвижности.

В третьей части первой главы рассмотрены источники ионизации, применяемые в существующих спектрометрах ионной подвижности, среди которых наиболее распространен источник на основе радиоактивного изотопа ^{63}Ni , достоинствами которого являются простота изготовления, отсутствие потребления мощности и стабильность характеристик в процессе работы. Принципиальным недостатком данного источника ионизации являются ограничения производства, эксплуатации, транспортировки и утилизации. Нерадиоактивные источники ионизации основаны на ионизации газов под действием ультрафиолетового или лазерного излучения и ионизации распылением жидкости в электрическом поле. Однако наиболее перспективным является применение импульсного коронного разряда с геометрией типа острие-острие, позволяющей задать четко определенные условия горения разряда с возможностью перехода в искровой режим работы. Вопросы образования положительных и отрицательных ионов и стабильности работы источника ионизации на основе коронного разряда подробно изучены в масс-спектрометрии. Импульсный характер работы обеспечивает малую потребляемую мощность и препятствует разрушению электродов. Нестабильность состава газа в силу импульсного характера ионизации решается увеличением расстояния между электродами коронного разряда и созданием реверсивного воздушного потока.

В четвертой части литературного обзора рассмотрены варианты конструкции дрейфовой трубки, являющейся основным элементом спектрометра ионной подвижности. С учетом описанных в литературе конструкций, наиболее перспективной является дрейфовая трубка с интегрированными нагревателями для обеспечения постоянной термической очистки и поддержания стабильной температуры в области ионизации и дрейфа, выполненная по технологиям изготовления печатных плат и лазерной резки тонкого листового металла.

Важность разработки математической модели движения ионов с последующим проведением компьютерного моделирования, являющейся наиболее эффективным способом расчета конструктивных и электрических параметров, рассмотрена в пятой части первой главы.

На основании проведенного анализа литературных данных были сформулированы задачи настоящей работы.

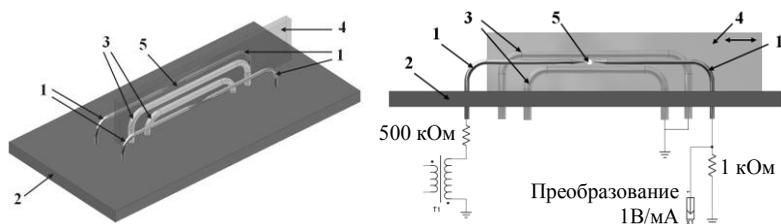
Вторая глава посвящена исследованию процесса ионизации пробы в спектрометре ионной подвижности и разработке системы управления источником ионизации на основе импульсного коронного разряда. Многоступенчатый процесс образования ионов исследуемого вещества заключается в образовании положительно и отрицательно заряженных реактант-ионов и последующей передаче заряда молекулам исследуемого вещества по механизму химической ионизации при атмосферном давлении.

При увеличении влажности или уменьшении температуры увеличивается степень гидратации иона, что приводит к изменению подвижности ионов (K), определяемой как отношение скорости дрейфа иона (V_d) к напряженности электрического поля (E). Для приведения результатов измерений подвижности (K) к стандартным значениям температуры и атмосферного давления вводится параметр приведенной подвижности (K_0), рассчитываемый по формуле:

$$K_0 = K * (273/T) * (P/760), \quad (1)$$

где значение температуры (T) задается в градусах Кельвина, а значение давления дрейфового газа (P) в миллиметрах ртутного столба.

Исследование работы коронного разряда в импульсном режиме проводилось на специально разработанном макете, состоящем из диэлектрической подложки с двумя разрядными промежутками типа острие-острие (рис.2), системы управления на основе 8-разрядного RISC микроконтроллера, компьютера с управляющей программой и двухканального цифрового осциллографа Tektronix TDS-1001B. Макет позволяет изменять полярность выходного высокого напряжения с помощью механического переключателя, содержит резистивные цепочки для ограничения тока разряда и обеспечения одновременного электрического пробоя в обеих парах электродов и цепь делителя для измерения импульсов высокого напряжения с помощью цифрового осциллографа.



1 – Электроды из платиновой проволоки, диаметр 0,5 мм.; 2 – Несущая печатная плата, толщина 1,6 мм, материал FR4; 3 – Медный заземленный электрод; 4 – Прозрачная перемещаемая перегородка, толщина 1 мм, материал поликарбонат; 5 – Отверстие диаметром 0,5 мм для оптической связи двух пар электродов коронного разряда.

Рис. 2. Конструкция макета для исследования импульсного коронного разряда.

В результате исследований установлено, что ультрафиолетовое излучение, генерируемое при разряде в одном разрядном промежутке, вызывает разряд в другой паре электродов, что позволяет формировать источники ионизации на основе коронного разряда с несколькими синхро-

низированными разрядными промежутками. Ионизация пробы также происходит под влиянием ультрафиолетового излучения. Амплитуда спектрометрического сигнала является линейной функцией от количества импульсов разряда коронного источника за один такт измерения, что делает возможным плавную регулировку уровня общего заряда на коллекторе ионного тока. Формирование воздушного потока около электродов ограничивает накопление и поступление соединений, образованных коронным разрядом, в область ионизации, увеличивая чувствительность к парам взрывчатого вещества (тринитротолуол) более, чем в 5 раз.

Температура дополнительного нагрева острия разрядного электрода в случае одиночного разряда с типовой энергией практически не зависит от материала электрода и составляет около 40°C , исключая перегрев поверхности и деградацию электродов по механизму термического распыления. Однако, с учетом окисления поверхности при длительной работе при повышенной температуре электродов, предпочтительным материалом для изготовления электродов является платина.

Разработанная система управления источником ионизации на основе импульсного коронного разряда состоит из управляющего микроконтроллера и формирователя высоковольтного импульса, выполненного по обратноточковой схеме с использованием ключа на МОП-транзисторе и высоковольтного трансформатора с малой индуктивностью первичной обмотки. Согласование резонансных частот контуров первичной и вторичной обмотки реализуется за счет конденсатора в контуре первичной обмотки. Интегрированные ограничивающие ток разряда резисторы обеспечивают уменьшение емкости и взаимного шунтирования разрядных электродов, а также снижение уровня электромагнитной наводки, влияющей на высокочувствительный усилитель ионного тока.

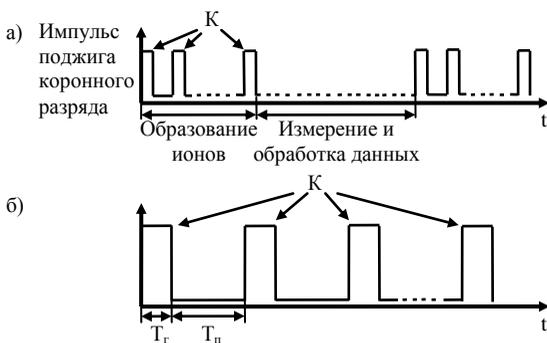


Рис. 3. Временная диаграмма работы источника ионизации (а); последовательность из К поджигающих импульсов за один цикл измерения (б).

Система управления формирует последовательность, показанную на рис.3, которая состоит из нескольких поджигающих импульсов с возможностью регулировки длительности подачи высоковольтного сигнала на острия источника ионизации $T_{г}$, временного интервала между такими импульсами $T_{п}$ и количества импульсов K за один цикл измерения.

Полученные параметры работы источника ионизации на основе коронного разряда позволяют обеспечить его стабильную работу и подстройку характеристик в режиме реального времени.

Третья глава посвящена описанию системы управления спектрометром ионной подвижности. Управляющая ЭВМ, выполняющая основные контрольные функции и ресурсоемкие операции по обработке результатов измерений, образует первый уровень в архитектуре системы управления. На втором уровне располагаются микроконтроллеры-диспетчеры, которые выполняют обработку адресной части протокола установления связи и распределяют информационные потоки. На третьем уровне располагаются вторичные контроллеры, в функции которых входит циклический опрос различных датчиков и формирование сигналов управления различными блоками. Четвертый уровень в архитектуре системы управления занимают исполнительные устройства и датчики, которые образуют единое функциональное целое с вторичными контроллерами. Данная архитектура обеспечивает работу вторичных контроллеров в отключенном изолированном режиме, что является очень важным при выполнении операций, которые требуют точной временной привязки и не допускают прерывания. Система передачи данных построена на коммутации линий связи последовательного асинхронного интерфейса UART. Связь между устройствами осуществляется в дуплексном режиме и устанавливается исключительно по запросу ЭВМ. Обмен данными между управляющей ЭВМ и вторичными контроллерами осуществляется с использованием помехозащищенного интерфейса связи RS485.

Процесс коммутации потенциалов при работе ионного затвора реализуется в вариантах схем на основе импульсных трансформаторов и фотогальванических преобразователей. Система управления на основе трансформаторов состоит из традиционной схемы накачки заряда с плавной регулировкой амплитуды и оригинальной схемы формирования импульса, которая выполняет функции передачи логического сигнала и одновременно питания триггерной системы с возможностью передачи сигналов миллисекундной длительности на затвор ключевого транзистора. Таким образом реализуется плавная регулировка амплитуды импульса напряжения с заданными временными характеристиками, гальванической развязкой и питанием триггерной системы от управляющих импульсов.

Управление двухканальным электростатическим затвором на основе фотогальванических преобразователей построено на использовании слаботочного элемента гальванической развязки одновременно для передачи логического сигнала и для питания логических буферных элементов, обеспечивающих высокую скорость срабатывания ключевых транзисторов. Питание каждого канала осуществляется от двух фотогальванических преобразователей (PVI5080N), обеспечивающих гальваническую развязку низковольтной цепи управления и высоковольтной цепи коммутации. Логические микросхемы выполняют функции буферных элементов, обеспечивая высокую скорость срабатывания ключевых транзисторов. Достоинствами разработанной схемы управления являются простое схемотехническое исполнение, высокая скорость переключения, гальваническая развязка цепей, возможность переключения под высоким напряжением и возможность коммутации высоких напряжений, ограниченных параметрами пробоя ключевых транзисторов.

Конструктивно электростатический ионный затвор образован двумя сетками из нержавеющей стали, расположенными на расстоянии около 1 мм друг от друга, и выталкивающим электродом. Потенциалы на одной из сеток и на выталкивающем электроде изменяются по командам микроконтроллера.

Процесс формирования потенциалов выталкивающего электрода и электростатического затвора под управлением микроконтроллера разделен на семь последовательных фаз, при переключении которых изменяются напряженности электрического поля в области ионизации E_1 и в области затвора E_2 . Временная структура электрических полей в области ионизации и области ионного затвора показана на рис. 4.

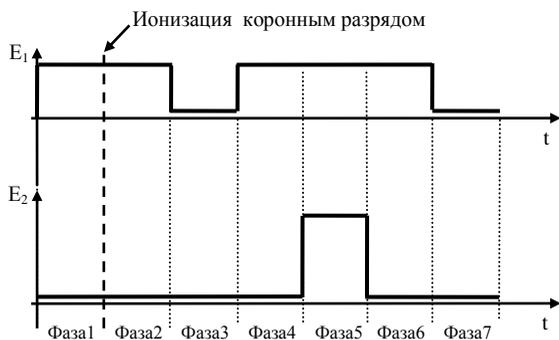


Рис.4. Распределение полей в области ионизации E_1 и области затвора E_2 во время функционирования электростатических затворов.

Система формирования высокого напряжения основана на использовании импульсного интегрального регулятора LM2675-ADJ с выходным напряжением от 4 до 12 В, управляемого аналоговым сигналом от микроконтроллера. Выходной сигнал поступает на преобразователь трансформаторного автогенератора высокого напряжения на основе трансформатора и диодного умножителя с выходным напряжением 3 кВ. Мониторинг уровня высокого напряжения осуществляется через цепь обратной связи с резистивным делителем и операционным усилителем. Переключение полярности механическим образом реализуется сменой полярности подключения диодного умножителя напряжения, размещенного на отдельной миниатюрной печатной плате. Быстрое электронное переключение полярности реализуется последовательным включением источников положительного и отрицательного напряжения, что обеспечивает высокий КПД, компактность, низкую себестоимость компонентов и быстроту переключения.

Условия детектирования, давление, температура и влажность в области дрейфа являются определяющими для расчета приведенной подвижности, что требует постоянного контроля этих параметров. Модуль стабилизации температуры обеспечивает измерение температуры интегральным датчиком и ШИМ регулирование мощности нагрева на базе силового полевого транзистора и резистивного нагревательного элемента. Мониторинг уровня атмосферного давления осуществляется интегральным датчиком с температурной компенсацией и калибровкой. Датчик относительной влажности представляет собой монолитный сенсор, для температурной компенсации дополненный интегральным датчиком температуры.

В четвертой главе приведено описание разработанной методики расчета и набора программ на её основе с унифицированным интерфейсом, предназначенных для моделирования распределения силовых линий электрического поля и траектории движения ионов на основе решения системы уравнений Лапласа:

$$\nabla^2\varphi = 0. \quad (2)$$

Принцип расчета программы состоит в представлении расчетного участка дрейфовой трубки как регулярной резистивной структуры, образующей однородную проводящую область с заданными граничными условиями, определяемыми геометрией и потенциалами на электродах. Значения потенциалов для всех узлов вычисляются по закону Кирхгоффа, после чего происходит построение траекторий движения ионов.

Проведенные численные расчеты показали, что снижение потерь ионов в узлах коллектора ионного тока и ионного затвора в совокупности с требованиями обеспечения механической прочности требует минимизации толщины сетчатых электродов до 0,12 мм, а также высокой точности совмещения элементов и создания фокусирующего электрического поля. Определены условия гарантированного закрытия ионного затвора, визуальная модель траектории движения ионов в этом случае представлена на рис.5.

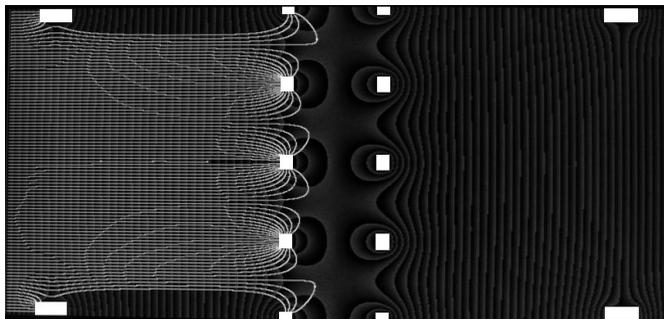


Рис.5. Траектории движения ионов в закрытом состоянии электростатического затвора.

Моделирование движения ионов при расстоянии от боковой стенки до проводящих электродов $d = 5$ мм показало, что при малой глубине электродов $p = 0,5$ мм имеют место значительные потери заряда, как показано на рис.6, где также приведены основные размеры, использованные при расчетах.

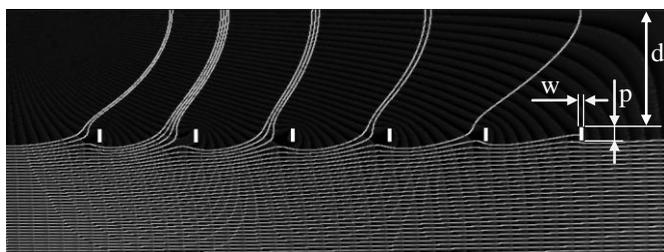


Рис.6. Траектории движения ионов при недостаточных размерах проводящих электродов ($p = 0,5$ мм, $d = 5$ мм).

Численный расчет вероятности электрического пробоя в дрейфовой области между боковой стенкой и набором расположенных с шагом 2,5

мм проводящих электродов шириной 0,35 мм показал, что при зазоре $d = 5$ мм и разности потенциалов 2 кВ напряженность поля составляет около 10 кВ/см. С учетом того, что для электрического пробоя в воздухе при нормальных условиях напряженность поля должна составлять около 30 кВ/см, в приведенной конструкции возможность электрического пробоя отсутствует.

При увеличении ширины электрода w до 2 мм потери заряда исчезают, однако существенно уменьшается эффективный диаметр канала движения ионов. Поэтому предпочтительным вариантом является сохранение ширины электрода $w = 0,35$ мм, что обеспечивает его механическую жесткость при увеличении глубины электрода p до 4 мм.

Численный расчет источника ионизации показал необходимость введения отражателя ионов, смонтированного на выталкивающем электроде источника ионизации, с длиной, равной половине длины области ионизации, который обеспечивает формирование траекторий ионов для соответствия апертуре канала транспортировки в области дрейфа.

В пятой главе приведено описание разработанной конструкции дрейфовой трубки на основе печатных плат, показанной на рис.7. Функцию несущего элемента с интегрированным делителем высокого напряжения выполняет несущая печатная плата 1 с двухсторонней металлизацией. Перпендикулярно несущей печатной плате 1 с шагом 2.5 мм устанавливаются электроды 2, изготовленные из тонкого листового металла методом лазерной резки, формируя камеру дрейфа. Крепление проводящих электродов 2 в несущей печатной плате 1 осуществляется пайкой штыревых выступов 10 в соответствующие металлизированные сквозные отверстия, что обеспечивает надежный электрический контакт, герметичность и высокую точность позиционирования.

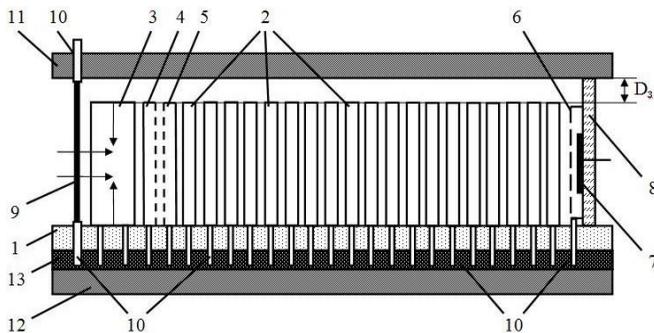


Рис.7. Структура дрейфовой трубки на основе печатных плат.

На несущей печатной плате 1 размещаются источник ионизации на основе коронного разряда 3, электростатический ионный затвор, образованный сетчатыми электродами 4 и 5, экранирующая коллекторная сетка 6 и коллектор ионного тока 7, закрепленный на торцевой стенке 8. Замкнутый объем вокруг электродов областей ионизации и дрейфа формируется герметичной оболочкой 9, оснащенной патрубками для ввода газа и интегрированными нагревателями 11. Передача тепловой энергии от нагревателя 12 к несущей печатной плате 1 осуществляется с помощью теплопроводящего слоя 13.

Дрейфовая трубка на основе печатных плат имеет габариты 135x35x25 мм и массу 105 г. Разработанный на её основе компактный ручной спектрометр типа «моноблок» с устройством индикации, клавишами управления и разъемами для подключения внешних устройств управления и индикации имеет массу 2,5 кг (рис.8).

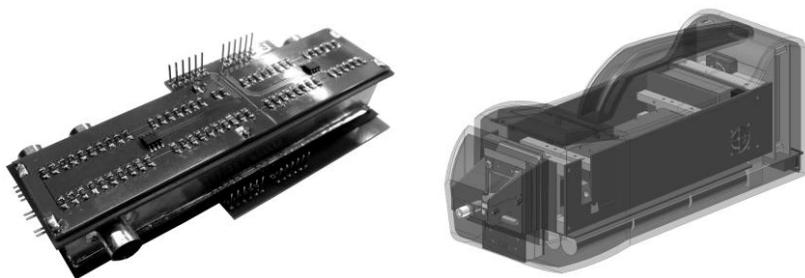


Рис. 8. Дрейфовая трубка на основе печатных плат (слева) и малогабаритный ручной спектрометр типа «моноблок» (справа).

Шестая глава посвящена экспериментальной апробации разработанного спектрометра ионной подвижности. Анализ спектрограмм отрицательных и положительных ионов показал, что в режиме детектирования положительных ионов необходимо устанавливать большую длительность инъекции ионов из области затвора в область дрейфа, чем при детектировании отрицательных ионов. Детектирование медленных отрицательных ионов требует увеличения интенсивности ионизации путем увеличения количества разрядов за один такт измерения.

Время, необходимое для смены полярности высокого напряжения, составляет 10 секунд, при этом изменение уровня высокого напряжения в дрейфовой области отслеживается системой управления в режиме реального времени, обеспечивая гарантированное детектирование и распознавание веществ. Разработанная система стабилизации температуры и ин-

тегрированные нагреватели обеспечивают выход прибора на режим по температуре за время, не превышающее 5 минут, при этом потребление энергии на нагрев снижено до 4 раз по сравнению с традиционной дрейфовой трубкой на основе массивных металлических проводящих электродов.

Детектирование веществ проводилось с использованием системы пробоотбора на основе термической десорбции, состоящей из сменного носителя, на который предварительно наносилась проба, и нагревательного элемента, обеспечивающего нагрев сменного носителя до определенной температуры, зависящей от детектируемого вещества.

На рис. 9 показана спектрограмма нитроглицерина, моделирующего взрывчатые вещества, в присутствии мешающего фактора в виде молочной кислоты, содержащейся на коже человека, что демонстрирует возможность детектирования взрывчатых веществ в реальных условиях эксплуатации. Значение приведенной подвижности нитроглицерина $K_0 = 1,29$, рассчитанное на основе известных геометрических и режимных параметров в дрейфовой области, полностью совпадает со значением, приводимым в авторитетных источниках.

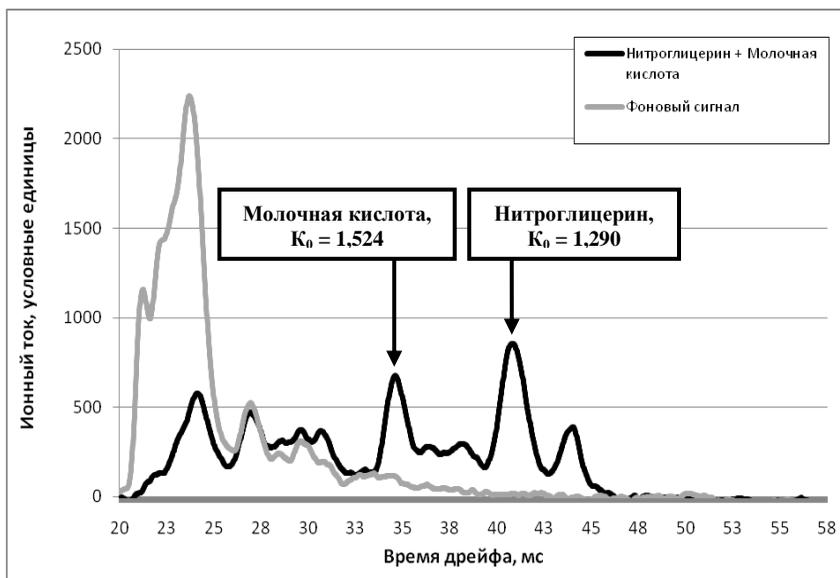


Рис. 9. Спектрограмма отрицательных ионов молочной кислоты и нитроглицерина при обнаружении с рук человека.

Спектрограмма новокаина, являющегося общедоступным незапрещенным к распространению и хранению малолетучим органическим веществом, моделирующим наркотическое вещество, в присутствии мешающего фактора никотина, содержащегося на пачках сигарет, приведена на рис.10. Полученное значение приведенной подвижности новокаина $K_0 = 1,31$ полностью совпадает со значением, приводимым в авторитетных источниках.

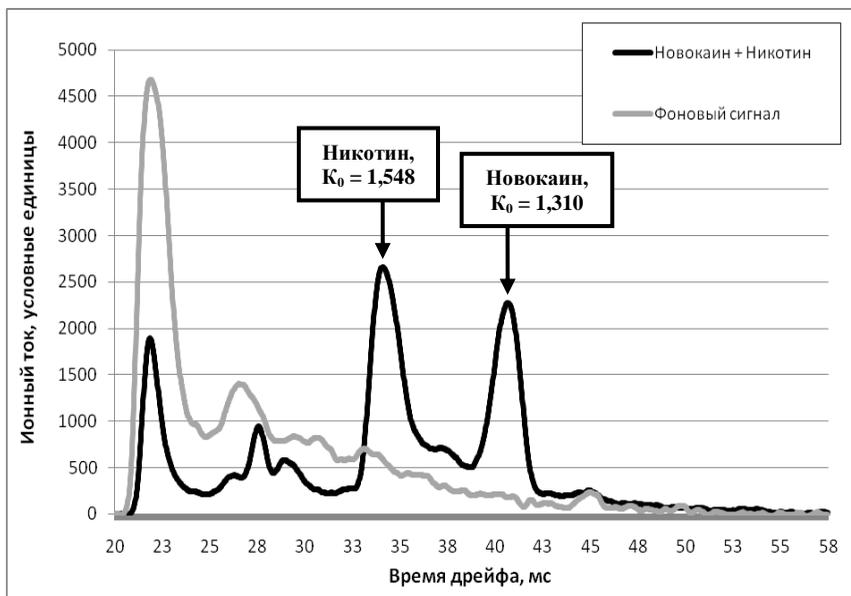


Рис. 10. Спектрограмма положительных ионов новокаина и никотина при обнаружении на упаковке табака.

Проведенные исследования по обнаружению веществ, моделирующих взрывчатые и наркотические вещества, показали высокую точность обнаружения, стабильность параметров обнаружения при изменяющихся параметрах работы прибора и внешних факторах, пригодность прибора для работы по поиску сверхмалых количеств веществ в реальных условиях, в том числе в присутствии мешающих веществ.

Заключение

Основные научные и практические результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Разработанный набор программ для расчета электрических полей в многоэлектродных структурах позволил определить электрические и геометрические параметры источника ионизации, ионного затвора, дрейфовой области и коллекторного узла.
2. Разработана компоновка моноблочного ручного спектрометра ионной подвижности на основе малогабаритной дрейфовой трубки со встроенной ЭВМ, аккумуляторной батареей, блоком осушения воздуха и пробоотборным устройством, обеспечивающая высокую степень конструктивной интеграции и массу 2,5 кг, что является рекордным показателем для подобного рода устройств.
3. Разработана система управления и конструкция пространственно-распределенного источника положительных и отрицательных ионов на основе импульсного коронного разряда с дублированием пар электродов и синхронизацией разрядов на основе оптической связи, позволяющая плавно регулировать величину заряда ионов.
4. Разработаны система формирования высокого напряжения с быстрым электронным переключением полярности и система управления электростатическим затвором и выталкивающим электродом с фотогальванической развязкой, реализующие одновременное детектирование положительных и отрицательных ионов.
5. Предложена и реализована конструкция дрейфовой трубки на основе печатных плат с интеграцией газовых вводов, пассивных элементов распределения высокого напряжения, разъемов для подключения активных компонентов систем регулирования и нагревательных элементов, позволяющая в несколько раз уменьшить массогабаритные параметры, теплоемкость, время выхода на рабочий режим и потребляемую мощность по сравнению с традиционной конструкцией.
6. Проведена экспериментальная апробация работы спектрометра по детектированию нитроглицерина, моделирующего взрывчатое вещество, и новокаина, моделирующего наркотическое вещество, в том числе в присутствии маскирующих веществ. На основании сравнения полученных значений подвижности ионов со значениями, указанными в авторитетных источниках, показана корректность детектирования и возможность использования спектрометра для поиска сверхмалых количеств веществ в реальных условиях.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Федин В.И., Назаров М.С., Першенков В.С., Кушнерук Д.В., Беляков В.В., Тихонов М.М., Головин А.В., Исследование технического красного фосфора методом спектрометрии ионной подвижности // Заводская Лаборатория. Диагностика материалов 2007. № 8. Том 73.
2. Беляков В.В., Головин А.В., Першенков В.С., Экспериментальные исследования спектрометра ионной подвижности с источником ионизации на основе коронного разряда // Датчики и Системы 2009. № 2. С.12-17.
3. Беляков В.В., Головин А.В., Васильев В.К., Кушнерук Д.В., Першенков В.С., Тихонов М.М., Устройство для обнаружения следовых количеств взрывчатых веществ на пальцах человека и документах // Датчики и системы 2009. № 7, С. 44-49.

Патенты РФ

4. Агарков Ю.К., Беляков В.В., Головин А.В., Егоров С.А., Кушнерук Д.В., Максимов Н.Н., Миночкина Е.В., Першенков В.С., Танков В.И., Тихонов М.М., Носитель для отбора пробы малолетучего органического вещества и устройство для ввода пробы с его использованием // Патент на полезную модель № 91433.
5. Агарков Ю.К., Беляков В.В., Головин А.В., Егоров С.А., Кушнерук Д.В., Максимов Н.Н., Миночкина Е.В., Першенков В.С., Танков В.И., Тихонов М.М., Спектрометр подвижности ионов для обнаружения малолетучего органического вещества // Патент на полезную модель № 84564.
6. Агарков Ю.К., Беляков В.В., Головин А.В., Егоров С.А., Кушнерук Д.В., Максимов Н.Н., Миночкина Е.В., Першенков В.С., Танков В.И., Тихонов М.М., Устройство для обнаружения малолетучих органических веществ // Патент на полезную модель № 82856.
7. Беляков В.В., Головин А.В., Першенков В.С., Устройство дрейфовой трубки спектрометра ионной подвижности // Решение о выдаче патента на изобретение от 23 марта 2010 года.

Статьи и материалы конференций

8. Головин А.В., Разваляев А.Ю., Разработка малогабаритного спектрометра ионной подвижности // С.139-140 Научная Сессия МИФИ-2005. Сборник научных трудов. В 15 томах. Т.1. Автоматика. Микроэлектроника. Электроника. Электронные измерительные системы. Компьютерные медицинские системы. М.: МИФИ, 2005. – 336 с.

9. Кушнерук Д.В., Тихонов М.М., Головин А.В., Разработка платы управления преконцентратором спектрометра ионной подвижности // С.97-98 Научная Сессия МИФИ-2006. Сборник научных трудов. В 16 томах. Т.1. Автоматика. Микроэлектроника. Электроника. Электронные измерительные системы. Компьютерные медицинские системы. М.: МИФИ, 2006. – 300 с.
10. Тихонов М.М., Кушнерук Д.В., Головин А.В., Устройство управления затворами спектрометра ионной подвижности // С.99-100 Научная Сессия МИФИ-2006. Сборник научных трудов. В 16 томах. Т.1. Автоматика. Микроэлектроника. Электроника. Электронные измерительные системы. Компьютерные медицинские системы. М.: МИФИ, 2006. – 300 с.
11. Головин А.В., Структура фонового сигнала для положительных ионов в спектрометре ионной подвижности // С.87-88 Научная Сессия МИФИ-2007. Сборник научных трудов. В 17 томах. Т.1. Автоматика. Микроэлектроника. Электроника. Электронные измерительные системы. Компьютерные медицинские системы. М.: МИФИ, 2007. – 292 с.
12. Першенков В.С., Беляков В.В., Головин А.В., Кушнерук Д.В., Тихонов М.М., Портативный прибор для обнаружения следовых количеств взрывчатых веществ // Chip News. 2007. № 4. С. 40-41.
13. Головин А.В., Модернизация ионного источника на основе коронного разряда и повышение чувствительности спектрометра ионной подвижности // С.186-187 Научная Сессия МИФИ-2008. Сборник научных трудов. В 15 томах. Т.1. Автоматика. Микроэлектроника. Электроника. Электронные измерительные системы. Компьютерные медицинские системы. М.: МИФИ, 2008. – 208 с.
14. Головин А.В., Беляков В.В., Разработка и экспериментальная апробация сменного устройства неконтактного отбора проб с промежуточного носителя спектрометра ионной подвижности // С.77 Научная Сессия МИФИ-2009. Аннотации докладов. В 3 томах. Т.2. Нанозифика и нанотехнологии. Фундаментальные проблемы науки. Исследования материи в экстремальных состояниях. М.: МИФИ, 2009. – 280 с.
15. Беляков В.В., Головин А.В., Разработка сверхлегкой миниатюрной дрейфовой трубки спектрометра ионной подвижности на основе печатных плат // С.108 Научная Сессия МИФИ-2010. Аннотации докладов. В 3 томах. Т.2. Нанозифика и нанотехнологии. Фундаментальные проблемы науки. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 344 с.

Подписано в печать 12.04.2010

Печать трафаретная

Заказ №

Тираж 100 экз.

Типография «11-й ФОРМАТ»

ИНН7726330900

115230, Москва, Варшавское ш., 36

(499) 788-78-56

www.autoreferat.ru