

# ИСТОЧНИК ИОНОВ С ПРОДОЛЬНОЙ ИОНИЗАЦИЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ С МОЛЕКУЛЯРНЫМИ ПУЧКАМИ

А.В.Калинин<sup>а</sup>, Л.Ю.Русин<sup>а</sup>, Я.П.Тоенниес<sup>б</sup> (J.P.Toennies)

<sup>а</sup> *Институт энергетических проблем химической физики РАН, Москва, Россия.*

*e-mail: rusin@chph.ras.ru*

<sup>б</sup> *Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation, Göttingen, Germany.*

*e-mail: jtoenni@gwdg.de*

Описаны четыре варианта конструкций разработанного высокоэффективного, универсального масс-спектрометрического детектора молекулярных пучков и продуктов их рассеяния, выполненного по схеме с продольной ионизацией. Достигнутая эффективность ионизации частиц пучка атомарного гелия составляет  $10^{-3}$  ион/атом. Отношение полезного сигнала к фону в камере детектора при регистрации ионов с отношением массы к заряду  $m/q=4$  а.е.м. равняется  $3 \cdot 10^4$ .

## ВВЕДЕНИЕ

Пучки атомов и молекул представляют одно из наиболее эффективных средств в арсенале современной физики и особенно таких ее областей как молекулярная физика, физика атомных столкновений, спектроскопия, химическая физика, а также в ряде прикладных областей, таких как микроэлектроника, микролитография и т.п. Широкое использование атомных и молекулярных пучков (МП) в фундаментальных и прикладных исследованиях, а также в новых отраслях промышленности определяет большой интерес к совершенствованию арсенала методов получения и детектирования самих пучков и продуктов их взаимодействия с различного рода мишенями. Развитие техники молекулярных пучков очень интенсивно велось по различным направлениям, но наиболее значимый прогресс для всей области имели два из них - совершенствование методов получения пучков и эффективности их детектирования. В первом из этих направлений основные усилия прилагались к получению наибольшей интенсивности при возможно более узком распределении по скоростям и расширению круга атомов и молекул (особенно лабильных) доступных для исследования. Следует отметить, что прогресс в развитии первого направления оказался весьма существенным и в настоящее время можно рассчитывать на чрезвычайно широкий набор веществ, из которых можно сформировать пучки в широком диапазоне интенсивностей и энергий с узким распределением по скоростям. Второе направление связано с увеличением чувствительности методов детектирования пучков и продуктов их рассеяния. Эта проблема всегда была одной из основных для любого эксперимента с пучками и по сути дела одной из наиболее определяющих его глубину и успех.

Показательным примером в этом плане являются успешные исследования в ходе так называемой «щелочной эры» развития исследований с молекулярными пучками [1,2]. Даже с доступными в то время интенсивностями пучков были получены основополагающие фундаментальные результаты, касающиеся рассеяния атомов щелочных металлов и их галогенидов, во многом определившие развитие динамики столкновений [3,4]. Это оказалось возможным благодаря уникальной эффективности детекторов с поверхностной ионизацией, позволяющей регистрировать практически каждую частицу, попадающую в детектор.

На протяжении всей многолетней истории развития исследований с молекулярными пучками были предприняты большие усилия для создания универсальных детекторов, позволяющих выйти за рамки щелочных металлов и их солей и сделать объектом исследований все вещества и процессы, представляющие фундаментальный или прикладной интерес. Основные подвижки в этом направлении определило развитие масс-спектрометрии как необычайно гибкого метода, позволяющего оптимально приблизить конструкцию детектора к задачам каждого эксперимента. Прогресс, достигнутый в разработке технологичных и небольших магнитных масс-сепараторов, и особенно квадрупольных фильтров масс, в разработках новых источников ионов, в том числе предназначенных специально для работы с молекулярными пучками, определил возможность проведения уникальных исследований в области динамики элементарных процессов, динамики взаимодействия газа с поверхностью твердого тела, исследования слабо и сверх слабо связанных комплексов и во многих других фундаментальных и прикладных областях [5,6,7]. Здесь следует отметить, что успехи в развитии высокоэффективных источников ионов были значительно скромнее, чем в развитии сепараторов масс. Именно здесь, по-видимому, лежат основные ресурсы дальнейшего повышения эффективности детекторов пучков и, следовательно, возможностей реализации новых исследований с использованием молекулярных пучков.

В этой работе описывается новый высокоэффективный источник ионов для работы с газодинамическим молекулярным пучком. Источник разрабатывался для исследований димеров и других небольших кластеров не методом дифракции волн де Бройля на трансмиссионных дифракционных решетках. Однако, разработанная конструкция является очень гибкой и практически не имеет ограничений для использования в любых экспериментах с молекулярными пучками и обладает, насколько известно авторам, наибольшей эффективностью ионизации частиц газодинамического пучка, а также продуктов рассеяния, обладающих высокой кинетической энергией.

Статья построена следующим образом. После настоящего введения приведено очень краткое описание основных конструкций ионизаторов для молекулярных пучков. Затем кратко рассматриваются разработанные ранее ионизаторы для МП, наиболее успешно использованные в экспериментальной практике. В третьем разделе описывается конструкция источника и практически интересные ее варианты, которые могут оказаться полезными в экспериментальной практике. Разработанный источник испытывался на установке с газодинамическим пучком. Эта установка и результаты испытаний описываются в четвертом разделе. В заключении приводится сводка основных параметров описываемого источника, и рассматриваются некоторые перспективы его использования.

## **ДЕТЕКТИРОВАНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОГО ПУЧКА**

Проблема детектирования в исследованиях с молекулярными пучками имеет существенные особенности, отличающие его от традиционной масс-спектрометрии, и не сводится только к чувствительности и разрешающей способности прибора. Здесь имеет смысл определить такие важные факторы, характеризующие источник ионов для МП, как чувствительность источника к составляющим остаточного газа и эффективность ионизации частиц пучка.

В отличие от традиционной масс-спектрометрии, где газ можно считать неподвижным, в лабораторной системе координат, в молекулярном пучке газ обладает скоростью относительно зоны ионизации. При этом различают два случая: (а) пучок обладает

тепловым распределением скорости (т.е. энергия пучка является тепловой) и (б) сверхзвуковой или газодинамический пучок, энергия которого может находиться в пределах от 0.1 до 20 эВ. При этом в ионном источнике присутствует неподвижный остаточный газ различного происхождения, ионизация которого создает фоновый шум, затеняющий полезный сигнал. В традиционной масс-спектрометрии понятия чувствительность ионизатора и его эффективность практически совпадают. Для ионизатора молекулярного пучка эти понятия существенно различны. В этом случае чувствительность ионизатора показывает его реакцию на давление остаточного газа и как и в обычной масс-спектрометрии измеряется в А/Тор. Эффективность ионизатора пучка характеризует количество ионов на выходе ионизатора отнесенное к потоку нейтральных частиц, попадающему в ионизатор с молекулярным пучком, обладающему скоростью  $V$  в лабораторной системе координат. В этом случае скорость частиц пучка может играть серьезную роль, уменьшая время пребывания их в зоне ионизации и, следовательно, вероятность ионизации. Поэтому наиболее оптимальная конструкция ионизатора для молекулярного пучка должна обеспечить высокую эффективность ионизации частиц пучка и в то же время максимально устранить вклад, обусловленный остаточным газом, в регистрируемый сигнал. Такое разделение характеристик детектора позволяет сформулировать основное требование к ионизатору, которое состоит в возможно более сильном ограничении размеров области ионизации размерами входящего молекулярного пучка. Проиграв при этом в общей чувствительности детектора, можно, таким образом, существенно увеличить эффективность детектирования пучка и увеличить эффективное отношение сигнал/шум. Отмеченными случаями не исчерпываются требования к ионизатору молекулярного пучка. Большая часть работ с молекулярными пучками связана не с анализом самого пучка, а с измерениями характеристик рассеяния этого пучка на мишени, сопровождающегося упругим, неупругим или химическим рассеянием или дифракцией волн де Бройля, соответствующих частицам пучка, на решетках. Эти процессы имеют самые разные значения сечений, и потоки продуктов могут иметь очень малые величины. Детекторы таких установок, как правило, снабжаются несколькими стадиями дифференциальной откачки, и продукты рассеяния попадают в ионизатор в виде молекулярного пучка. Поэтому повышение эффективности ионизатора является основной задачей технического обеспечения эксперимента.

Ниже будут кратко описаны основные типы источников ионов, разработанных для ионизации молекулярного пучка.

В работе [8] Вайс предложил концептуальную конструкцию источника ионов, предназначенного для работы с молекулярным пучком. Высокая эффективность ионизатора достигалась за счет использования протяженной области ионизации и принципиально новой ее организации. В качестве источника электронов использовалась прямоугольная пушка Пирса с ускорением электронов при помощи сетки. Анод, расположенный над областью ионизации и сетка формируют пространственный заряд электронов с протяженным минимумом, который собирает и фокусирует образующиеся ионы по оси ионизатора. Возможные неоднородности полей, обусловленные несовершенством электродов и катода, которые могли бы препятствовать передаче ионов в масс-анализатор, компенсируются непараллельным расположением сетки и анода, что создает дополнительный градиент поля в направлении масс-анализатора. Эти две характерные особенности ионизатора Вайса были использованы в ряде последующих конструкций ионизаторов. Значительная конструкционная модификация этого источника для работы с химически активными частицами и точного определения потенциалов появления ионов была использована в работах [9, 10]. Другая модификация конструкции

Вайса использовалась в детекторе установки со скрещенными пучками Бернштейна [11].

Существенно более простая конструкция ионизатора с протяженной областью ионизации и фокусировкой пространственным зарядом в сочетании с квадрупольным фильтром масс была опубликована Бринком в [12]. В отличие от конструкции Вайса в этом ионизаторе электроны многократно пересекают область ионизации молекулярного пучка за счет применения в конструкции ионизатора отражателя. В установке со скрещенными пучками [13], которая явилась родоначальницей целого поколения супермашин, использовалось сочетание несколько измененной конструкции Бринка с квадрупольным фильтром масс в качестве универсального детектора рассеяния, в том числе и химического. В работе [14] предложена модификация этого источника за счет введения в область ионизации дополнительной сетки, препятствующей искажению потенциала в области ионизации вследствие проникновения в эту область потенциала катода и неоднородностей потенциала ускоряющей сетки. Это новшество по результатам авторов [14] позволило увеличить полезный сигнал и отношение сигнал\шум на выходе ионизатора.

Несколько в ином направлении развивались детекторы установок, разрабатываемых в Геттингене, где в качестве масс-сепараторов использовались компактные  $90^\circ$  магниты и приспособленные к ним источники ионов, разработанные Ланчем [15]. Отличительной чертой конструкции Ланча является ее высокая геометрическая прозрачность, позволяющая откачивать область ионизации до  $10^{-10}$ - $10^{-11}$  Тор, что сильно уменьшает фон остаточного газа. Кроме того легкие прозрачные конструкции всех электродов хорошо обезгаживаются прогревом от катода, что также значительно снижает фоновый сигнал, обусловленный десорбцией газа из внутренних областей электродов. Это особенно важно для работы с молекулами, обладающими сильной хемосорбцией или высокой растворимостью в металлах.

Принципиально другим подходом к созданию ионизатора МП является совмещение пучка и потока электронов, обладающих энергией, достаточной для ионизации частиц. Не вдаваясь в историю вопроса создания источника с продольной ионизацией, отметим, что существенного успеха добилась группа исследователей в Гейдельберге, построившая ионизатор с продольной ионизацией эффузионного пучка [16] для  $^3\text{He}$ -спинэхо спектрометра. Они использовали кольцевой катод из торированного вольфрама сравнительно большого диаметра и сжатие электронного пучка магнитным полем до размеров, сравнимых с размерами пучка. Для медленного эффузионного пучка по сообщению авторов чувствительность ионизатора по гелию составляла 0.22 А/мбар и была получена необычайно высокая эффективность  $\approx 0.7\%$  по гелию, что превышает все значения эффективности ионизации, опубликованные до сих пор в литературе. Такой же принцип построения ионизатора был выбран нами с целью построить детектор, предназначенный для регистрации сверхзвукового пучка атомов гелия и получения дифракционной картины взаимодействия пучка с трансмиссионной дифракционной решеткой.

## **ДЕТЕКТОР С ПРОДОЛЬНОЙ ИОНИЗАЦИЕЙ**

В этом разделе будут описаны результаты разработки и оптимизации ионизатора по схеме с продольной ионизацией пучка нейтральных частиц электронным ударом, при которой в области ионизации электронный пучок и пучок нейтральных частиц соосны. Основной задачей разработки является уменьшение вклада фонового газа в суммарный сигнал особенно на массе He и повышение эффективности детектирования молекулярного

пучка и продуктов его рассеяния. В разделе приведены только основные соотношения, описывающие движение электронов в магнитном поле, необходимые для понимания особенностей работы источника, основанной на этих соотношениях, а также детальное описание основных узлов ионизатора. Под воздействием магнитного поля в области ионизации электроны движутся по спирали. Этим в принципе может обеспечиваться наибольшая вероятность столкновения электронов с частицами пучка и, следовательно, большая, чем в случае поперечной ионизации, эффективность детектора.

На заряженную частицу, движущуюся в электрическом и магнитном полях, действует сила Лоренца [13]

$$F = qE + q[vB], \quad (1)$$

где  $q$  – величина заряда частицы,  $E$  – напряженность электрического поля,  $v$  – скорость частицы и  $B$  – магнитная индукция поля. Под действием первой составляющей заряженные частицы движутся по линиям магнитного поля с соответствующей полю энергией и ускоряются в направлении наибольшего градиента. Сила, испытываемая движущимся зарядом в магнитном поле, перпендикулярна как вектору скорости движения заряда  $v$ , так и вектору напряженности поля  $E$ . Таким образом, эта сила искривляет путь заряда, не изменяя величины его скорости. Если заряженная частица движется в однородном магнитном поле так, что вектор ее скорости направлен под некоторым углом  $\alpha$  к направлению вектора магнитной индукции  $B$ , то траекторией частицы является винтовая линия с радиусом витков

$$r = \left| \frac{m}{q} \right| \frac{v \sin \alpha}{B}, \quad (2)$$

и шагом винта

$$h = \frac{2\pi}{B} \left| \frac{m}{q} \right| v \cos \alpha. \quad (3)$$

Период обращения заряженной частицы в однородном магнитном поле не зависит от ее скорости

$$T = \frac{2\pi}{B} \left| \frac{m}{q} \right|, \quad (4)$$

Если рассмотренное выше движение происходит в неоднородном поле, магнитная индукция которого возрастает в направлении движения частицы, то радиус витков и шаг винта уменьшаются по мере увеличения  $B$ .

Траекториями в виде спиралей обладают в нашем случае как электроны, эмитируемые катодом, так и частицы пучка, ионизованные после столкновения с ними. В случае электронов, такая траектория значительно увеличивает проходимость электронами путь в пучке, образуя протяженную область ионизации с существенно большей вероятностью их столкновения с нейтральными частицами пучка.

Конструкция источника ионов приведена на рис. 1. Сводка основных деталей детектора и их краткая характеристика представлена в табл. 1. Потенциал каждого электрода ионизатора регулируется отдельным блоком питания. Использование напряжения смещения (+1 кВ) приводит к образованию ионов с большой потенциальной энергией, достаточной для их прохождения через магнитный сепаратор масс.

Одним из основных узлов ионизатора является катодно-анодная группа. Пучок нейтральных частиц попадает в ионизатор вдоль оси детектора через отверстие в кольцевом катоде 1. Электроны, эмитируемые с кольцевого катода, за счет ускоряющей разности потенциалов между катодом и анодом 7 движутся соосно с пучком. В качестве

источника электронов использовались катоды из торированного вольфрама или диспенсерный катод. В случае использования торированного вольфрама катод имел форму кольца диаметром 22 мм из проволоки диаметром 0.25 мм. Излучающая поверхность диспенсерного катода выполнена в форме кольца с внешним и внутренним диаметром 25 и 14 мм, соответственно.

Табл. 1. Компоненты источника ионов детектора с продольной ионизацией.

№	Название	Описание
1	Катод	Кольцевой из торированного вольфрама (1%Th99%W) или диспенсерный
2	Отражатель	Материал – нержавеющая сталь
3	Внутренний фокусирующий электрод	Материал – нержавеющая сталь
4	Внешний фокусирующий электрод	Материал – нержавеющая сталь
5	Линза	Материал – нержавеющая сталь
6	Сетка	из стальной проволоки диаметром 0.3 мм и площадью ячей 1 мм <sup>2</sup>
7	Анод	Медный цилиндр с внутренним каналом диаметром от 17 мм (на входе) до 20 мм (на выходе)
8	Магнитная катушка	103 витка медной трубки с квадратным сечением 4×4 мм и диаметром канала 2 мм
9	Вытягивающая линза	Диск из нержавеющей стали, толщиной 5 мм, с прямоугольным отверстием изменяющейся геометрии от 7×10 мм (на входе) до 12×15 мм (на выходе)
10, 11, 12	Фокусирующие линзы	Материал – нержавеющая сталь
13	Отклоняющие платы	Материал – нержавеющая сталь
14	Входная щель масс-спектрометра	Материал – нержавеющая сталь
18	Система охлаждающих трубок	Медные трубки внешним диаметром 6 мм и внутренним 4 мм
19	Вакуумные контакты	Для подвода охлаждающей воды и тока

Как показано на рис. 1 катод расположен в канавке отражателя 2, который поддерживается под потенциалом, равным потенциалу катода, и охватывает катод с трех сторон. Внутренний 3 и внешний 4 фокусирующие электроды внесены в конструкцию детектора для дополнительного и более полного вытягивания электронов из области катода. Их вторым назначением является фокусировка электронного пучка, для обеспечения наиболее полного его проникновения в область ионизации, расположенную внутри анода. Целью фокусировки является создание области ионизации, соизмеримой с объемом пучка внутри анода, что обеспечивает максимальную вероятность ионизации молекул пучка и уменьшение фона от ионизации остаточных газов в детекторе.

Одной из основных возможностей повышения эффективности ионизатора является увеличение длины зоны ионизации. Поэтому были проведены исследования зависимости эффективности работы ионизатора от расстояния между катодом и анодом L. С этой целью были исследованы компоновки с расстоянием  $L \approx 50, 75$  и  $95$  мм.

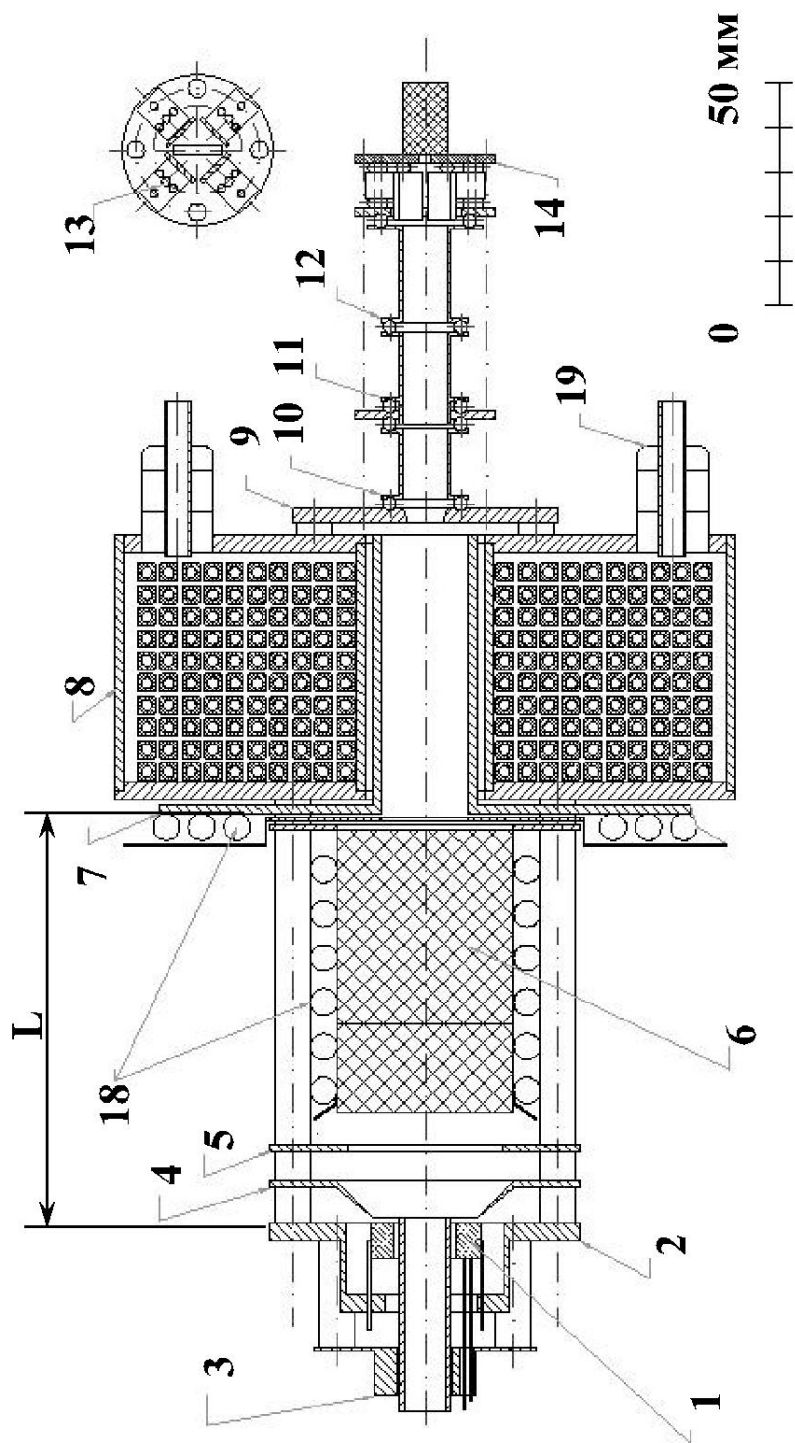


Рис. 1. Схема источника ионов детектора с продольной ионизацией. Цифровые обозначения приведены в табл. 1.

Сетка 6, расположенная между катодом и анодом обеспечивает постоянство электромагнитного воздействия на пучок электронов при их движении от катода к аноду. Форма сетки – цилиндр, диаметром 40 мм. Применение сетки из проволоки диаметром 0.3 мм и площадью ячеей 1 мм<sup>2</sup> обеспечивает высокую прозрачность, что позволяет эффективно откачивать область ионизации.

Анод по форме представляет собой медный диск диаметром 120 мм с отверстием в центре и вваренного в отверстие цилиндра длиной 60 мм с внутренним конусом, изменяющимся от диаметра 17 мм на входе до 20 мм на выходе из анода. Этот конус выполняет ту же роль, что расположенные под углом сетка и анод в источнике Вайса [8], т.е. создает градиент поля в сторону анализатора масс, для улучшения удаления образующихся ионов из области ионизации вытягивающей линзой 9. Цилиндр с конусом расположен внутри магнитной катушки, где магнитное поле является максимальным. Внутренний объем конической части анода является областью ионизации нейтральных частиц пучка. На периферии диска закреплено три витка медной трубки 18 для охлаждения анода жидким азотом.

Источником магнитного поля, под действием которого траектория движения электронов приобретает вид винтовой линии является магнитная катушка 8. Она изготовлена из медной трубки квадратного сечения 4×4 мм и внутренним каналом диаметром 2 мм. Навитая из трубки катушка состоит из 103 витков с изменением диаметра от 30 мм в центре до 140 мм по периметру катушки. Трубка изолирована при помощи каптоновой пленки, сохраняющей свои свойства в интервале температур от –120 до +180°С. Катушка помещена в герметичный цилиндр с двумя вакуумными контактами 19, для подвода напряжения и охлаждающей воды. Максимальное значение магнитной индукции при 103 витках в катушке и при токе 90 А составляет 130 мТ. Измеренные значения вектора магнитной индукции поля на оси катушки в зависимости от расстояния до входа в катушку, показаны на рис. 2.

Внутри анодного цилиндра происходит совмещение пучка нейтральных частиц с электронным пучком и образование ионов. Электроны, обладающие поступательным движением вдоль оси катушки, под влиянием силы Лоренца совершают вращательное движение по окружности с радиусом, зависящим от величины магнитной индукции поля.

Следующей важной задачей является вытягивание образовавшихся ионов из области ионизации. Для этого в конструкцию введена вытягивающая электростатическая линза 9, имеющая небольшой отрицательный потенциал относительно анода.

Схема фокусировки ионного пучка принята такой же как и в детекторе Ланча [15]. Вытянутые из области ионизации ионы через последовательность из трех электростатических линз (10, 11, 12) фокусируются в плоскости входной щели масс-спектрометра 14. Положение фокуса в этой плоскости регулируется двумя парами параллельных отклоняющих пластин 13.

Описанный источник ионов используется в составе масс-спектрометрического детектора, конструкция которого схематично показана на рис. 3. В детекторе используется 90° масс-анализатор 15. Радиус окружности движения заряженной частицы в магнитном поле  $r$  прямо пропорционален скорости иона  $v$  и отношению его массы к заряду  $m/q$ , обратно пропорционален напряженности магнитного поля  $B$ .

Для улучшения разрешения детектора по массе на входе в масс-анализатор и выходе из него установлены вертикальные щели размером 3×14 мм. Щели установлены на одинаковом фокусном расстоянии от центра магнита [17].



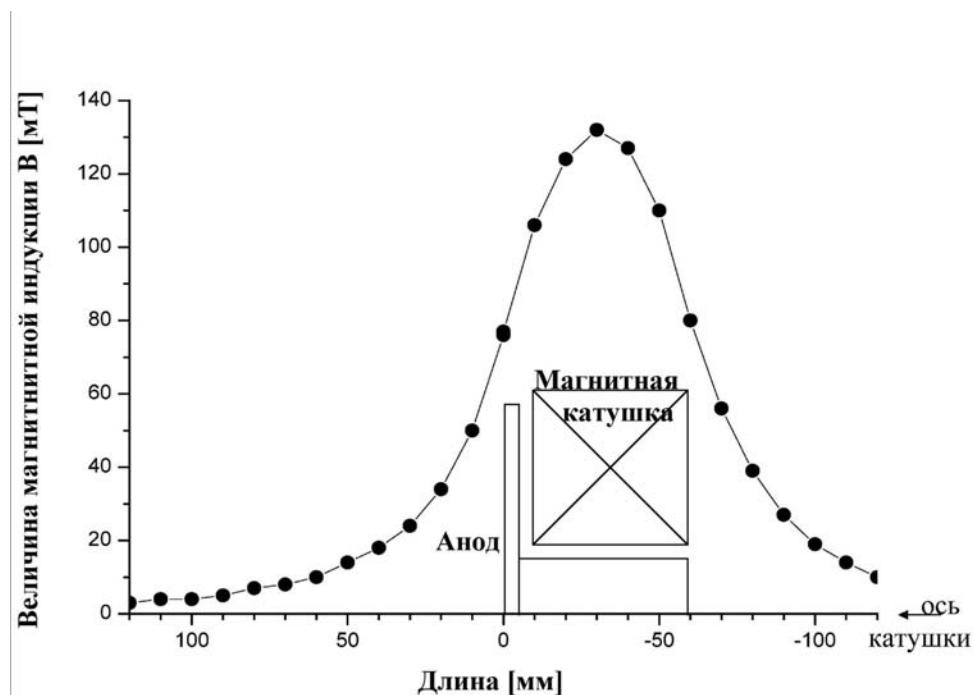


Рис. 2. Значение магнитной индукции вдоль оси катушки.

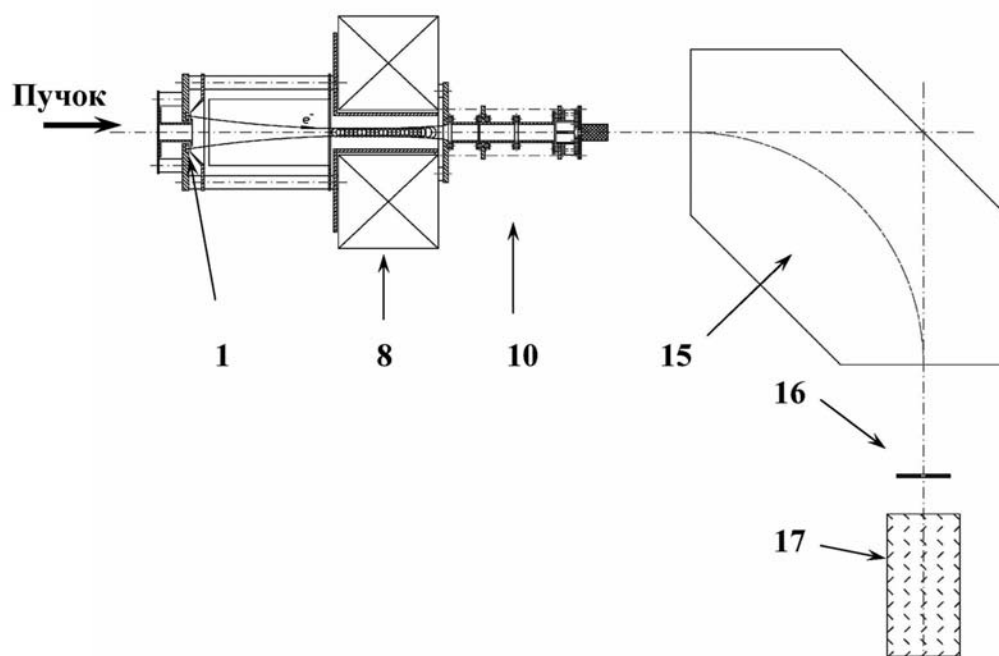


Рис. 3. Схема детектора с продольной ионизацией; 1- катод; 8- магнитная катушка; 10- ионная оптика; 15- 90° анализатор масс; 16- выходная щель анализатора масс; 17- электронный умножитель.

Для регистрации прошедших селекцию ионов использовался стандартный диодный вторичный электронный умножитель (ВЭУ), состоящий из 24-х медно-бериллиевых диодов и работающий в режиме счета. Возникающая электронная лавина, при попадании на коллектор состоит из порядка  $10^8$  электронов и представляет собой на выходе коллектора единичный импульс. Этот единичный импульс далее, после усиления в предусилителе, поступает в систему автоматического управления и контроля, построенную в стандарте КАМАК.

## ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ ПУЧОК И ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТЕКТОРА

Испытания и оптимизация каждого варианта конструкции детектора проводились на специально построенном стенде с газодинамическим пучком. Схема стенда показана на рис. 4. Список основных составляющих установки обозначенных на этом рисунке приведен в табл. 2 вместе с перечислением их основных характеристик.

Табл. 2. Список основных компонент испытательного стенда.

№	Название	Характеристики
I	Камера источника	$\sim 2 \cdot 10^{-7}$ мбар
II	Первая дифф. камера откачки	$\sim 1 \cdot 10^{-7}$ мбар
III	Вторая дифф. камера откачки	$\sim 1 \cdot 10^{-7}$ мбар
IV	Камера щели	$\sim 2.2 \cdot 10^{-8}$ мбар
V	Трубка Пито	
VI	Камера детектора	$\sim 2.4 \cdot 10^{-10}$ мбар
1	Газодинамический источник	Диаметр сопла 10 мкм
2	Скиммер	Диаметр 1.5 мм
4	Первая коллимационная щель	1.5×6 мм
5	Отверстие	Диаметр 7 мм
6	Манипулятор с коллимационной щелью	0.05×5 мм
7	Вторая коллимационная щель	1.5×6 мм

В камере I расположен источник сверхзвукового газодинамического пучка 1. При расширении газа из сопла в камеру с низким давлением происходит формирование газодинамической струи. Первая дифференциальная камера откачки II отделена от камеры источника коническим скиммером 2 - первым ограничивающим элементом пучка. Расстояние между соплом и скиммером оптимизировано на максимальную интенсивность регистрируемого сигнала в детекторе. Расположенный в камере флажок 3 применяется для перекрытия пучка. Вторая дифференциальная камера откачки III отделена от первой камеры коллимационной щелью высотой 6 мм и шириной 1.5 мм. Камера IV с регулируемой щелью является по своему функциональному назначению третьей дифференциальной камерой откачки. В камере, на манипуляторе, расположена щель шириной 50 мкм, высотой 5 мм и толщиной 0.125 мм отстоящая от скиммера на расстоянии 665 мм. Камера детектора V закреплена на установке с использованием четырех опор, что позволяет производить настройку детектора по шести координатам.

В этом разделе будут представлены результаты испытания 4-х наиболее эффективных конструкций детектора с продольной ионизацией.

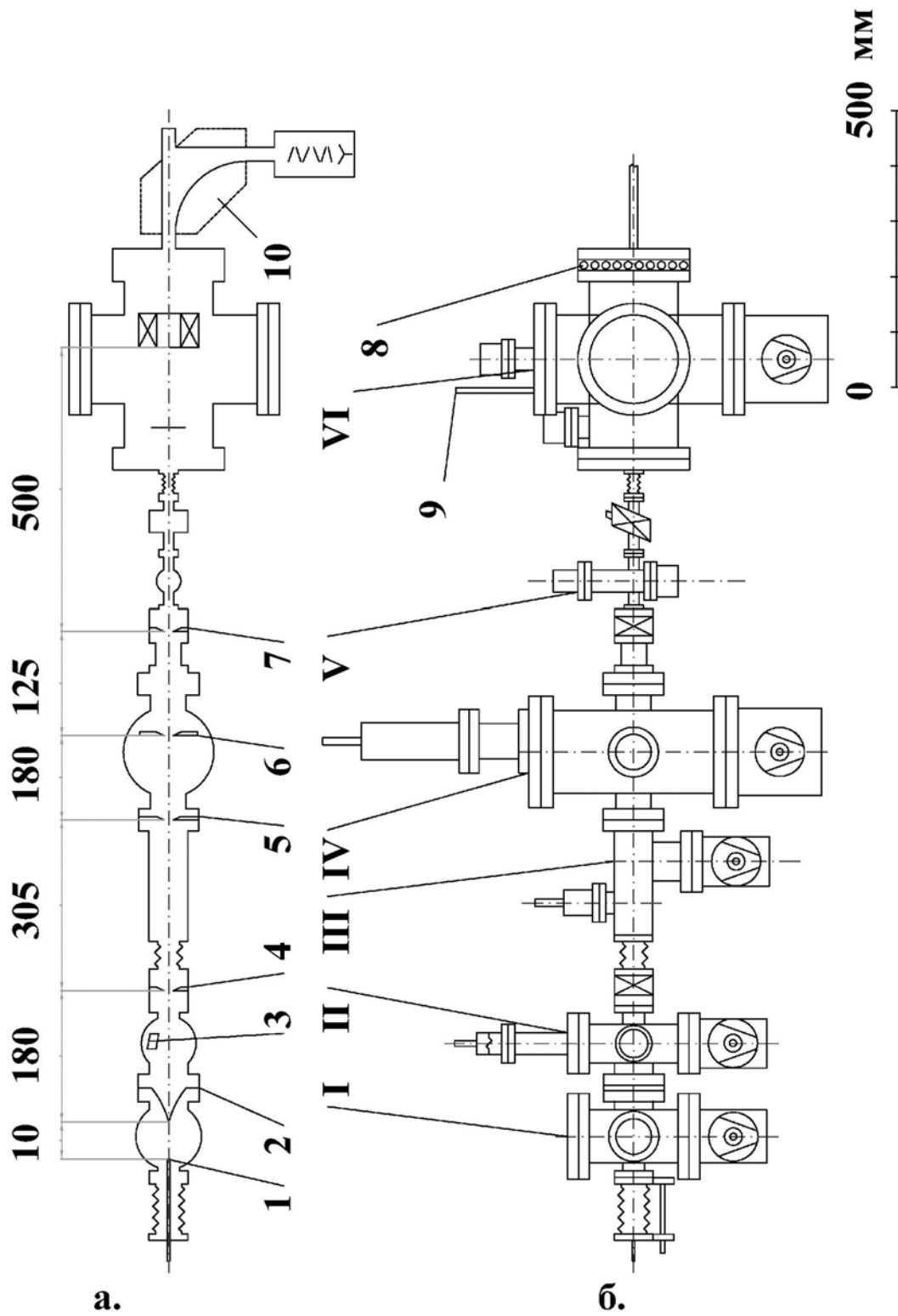


Рис. 4. Схема газодинамического испытательного стенда для тестирования детектора с продольной ионизацией. Цифровые обозначения приведены в табл. 2.

В первой конструкции расстояние  $L$  между катодом и анодом составляло 70 мм и использовался катод из торированного вольфрама. Вытягивающая линза была изготовлена из нержавеющей стали с прямоугольным отверстием в центре, изменяющейся геометрии, от  $7 \times 10$  мм на входе до  $12 \times 15$  мм на выходе.

Во втором варианте расстояние  $L$  равнялось 50 мм. Использовался катод из торированного вольфрама. Вытягивающая линза изготавливалась из мю-металла с усеченным конусом в центре с диаметром отверстий от 4 мм на входе до 8 мм на выходе. Испытывалась также линза из нержавеющей стали с прямоугольным отверстием изменяющейся геометрии.

Третья конструкция обладала расстоянием  $L = 95$  мм. Использовался катод из торированного вольфрама. Вытягивающая линза изготовлена из нержавеющей стали с прямоугольным отверстием изменяющейся геометрии. Для уменьшения парциальных давлений вымораживающихся при температуре жидкого азота газов в камере детектора к сетке и аноду механически подсоединена система охлаждающих трубок.

В отличие от первых трех конструкций в четвертой версии расстояние  $L = 95$  мм. Использовался катод диспенсерного типа. Вытягивающая линза изготовлена из нержавеющей стали с прямоугольным отверстием изменяющейся геометрии. Сетка и анод охлаждаются жидким азотом, подведенным посредством системы трубок, механически закрепленных по внешнему краю анодного диска и внешней поверхности цилиндра сетки.

Исследование работы каждого из вариантов детектора состояло в масс-спектрометрическом анализе ионизованных частиц пучка и остаточного газа в детекторе. Проводилось исследование зависимости сигнала пучка и фона от тока через магнитную катушку, т.е. от значения магнитной индукции поля создаваемого катушкой. С помощью такой зависимости производится оптимизация тока магнитной катушки для обеспечения наибольшей вероятности ионизации частиц пучка.

Радиус круговой орбиты электронов  $r_e$  в центре анода можно оценить следующим образом. Измеренное значение магнитной индукции на один ампер тока через катушку составляет 1.4 мТ. Зная рабочий ток (78 А) получим величину магнитной индукции в центре анода как  $B = 78 \times 1.4 = 109.2$  мТ. В качестве второго параметра используется энергия электронов, равная 130 эВ. По зависимостям радиуса движения электронов определенной энергии в магнитном поле (см. например [18]) определяется радиус витка спирали электронов в центре катушки  $r_e = 0.4$  мм. При этом поперечные размеры молекулярного пучка на входе в детектор определяются коллимационной щелью размером  $0.05 \times 5$  мм. При таком значении радиуса витка спирали электронов в центре анода обеспечивается максимальная эффективность детектора по газодинамическому пучку, и минимальная чувствительность к остаточному газу в камере детектора.

Для сравнения эффективности ионизации газодинамического пучка и остаточного газа в камере детектора, было проведено измерение регистрируемого ионного тока  $I_{ion}$  на первом диноде ВЭУ от парциального давления гелия  $P_{He}$  в камере детектора. Газ проникает через регулируемую течь непосредственно в камеру детектора. Измерение проводилось с целью определения чувствительности детектора как анализатора остаточного газа. Результаты исследования представлены на рис. 5. Они подтверждают линейность зависимости сигнала от потока атомов в камеру. Чувствительность детектора  $W$  определяется из обработки экспериментальных данных уравнением

$$I_{ion} = a + W \cdot P_{He}, \quad (5)$$

где  $a$  - коэффициент, учитывающий порог чувствительности амперметра. Расчетное

значение чувствительности детектора как анализатора остаточного газа составляет  $W=0.28\text{A/мбар}$ . Полученное значение сравнимо со значением группы из Гейдельберга (0.22) для гелия [16].

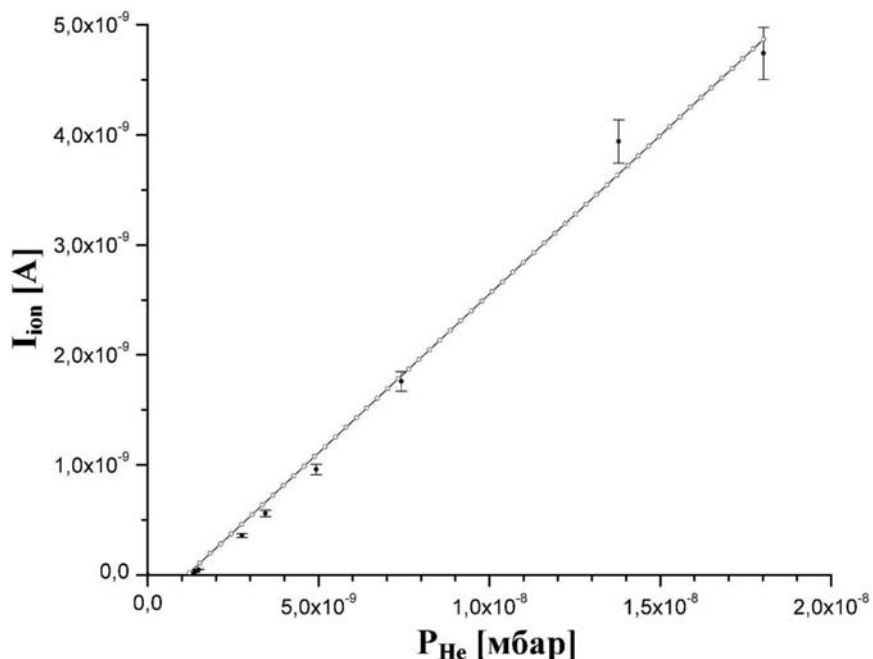
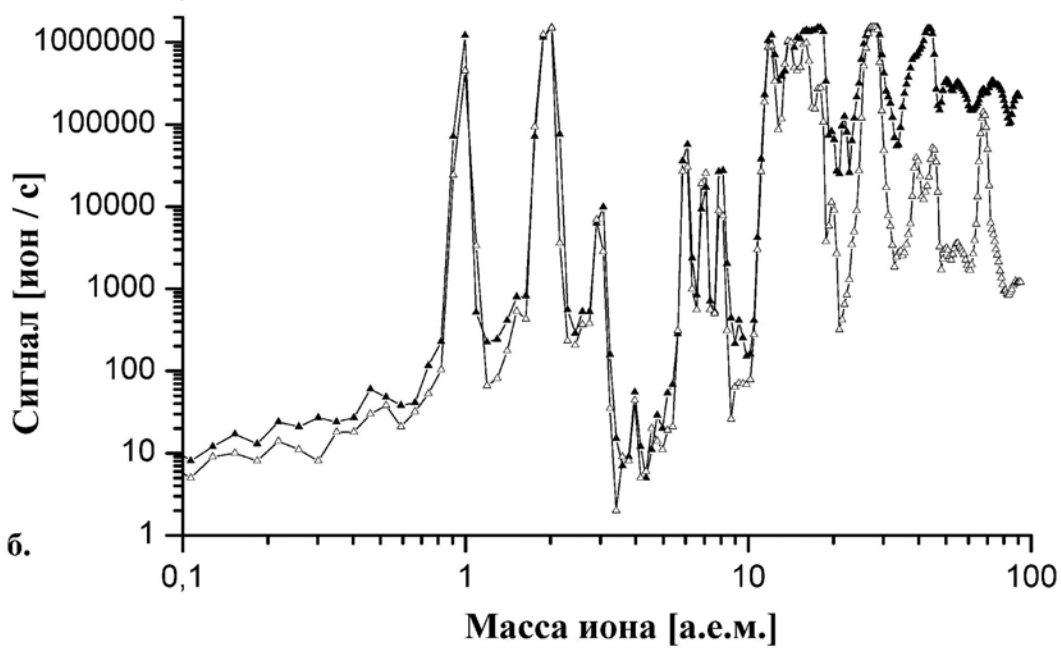
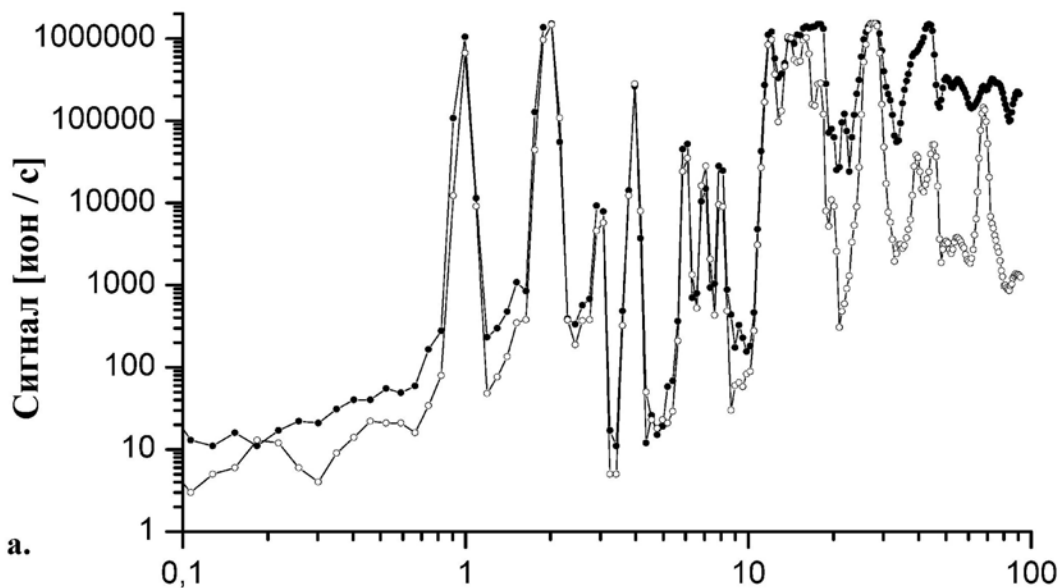


Рис. 5. Зависимость ионного тока  $I_{\text{ion}}$  на первом диноде ВЭУ от парциального давления гелия  $P_{\text{He}}$  в камере детектора. Измерение ионного тока проводилось при регистрации ионов с  $m/q=4$  а.е.м. Прямая отображает расчет согласно (5).

Типичные зависимости детектируемого сигнала газодинамического пучка гелия от массы иона, в четвертом варианте компоновки источника ионов, приведены на рис. 6а. Масс-спектр с полым кружком отображает зависимость сигнала в случае охлаждения сетки и анода жидким азотом, а с залитым кружком в случае отсутствия охлаждения. Как видно из сравнения спектров при охлаждении деталей не происходит изменения сигнала от газодинамического пучка гелия на массе  $m/q=4$  а.е.м.

Зависимости сигнала остаточного газа в камере детектора от массы иона представлены на рис. 6б. Масс-спектр с полым треугольником отображает зависимость фона в случае охлаждения сетки и анода жидким азотом, а с залитым треугольником в случае отсутствия охлаждения.

Введение в схему третьего варианта источника ионов линии охлаждения анодной сетки и анода до температуры жидкого азота уменьшает фон в детекторе за счет вымораживания остаточного газа, рис. 6. Однако использование охлаждения жидким азотом вызвало не только ожидаемое уменьшение фона на определенных массах, но и уменьшение сигнала от газодинамического пучка гелия при регистрации ионов с  $m/q = 4$  а.е.м. Проблема охлаждения катода была решена в 4-ом варианте, введением тепловой развязки, предотвращающей влияние охлаждения деталей детектора на температуру диспенсерного кольцевого катода. Работа тепловой развязки продемонстрирована на типичных масс-спектрах измеренных при охлаждении жидким азотом сетки и анода и без охлаждения, рис. 6 (а, б). Как видно из рисунка при охлаждении деталей не происходит уменьшения



Масса иона [а.е.м.]

сигнала для ионов с  $m/q = 4$  а.е.м., соответствующих атомарному гелию. Сравнение приведенных на рисунке масс-спектров остаточного газа для обоих случаев (с охлаждением и без) указывают на уменьшение фона для ионов с  $m/q = 6$  а.е.м. и отсутствие влияния в случае  $m/q = 4$  а.е.м.

В табл. 3 приведены значения рабочих параметров детектора, обеспечивающие наибольшую чувствительность при работе с диспенсерным кольцевым катодом.

Табл. 3. Типичные рабочие значения параметров детектора при работе с диспенсерным катодом в компоновке с расстоянием  $L = 95$  мм.

Ток / напряжение нагрева катода, [А]/[В]	8.0 / 12.9
Потенциал катода, [В]	884
Ток эмиссии, [мА]	25
Потенциал внешнего фокусирующего электрода, [В]	870
Потенциал внутреннего фокусирующего электрода, [В]	877
Потенциал линзы, [В]	848
Потенциал сетки, [В]	1133
Потенциал анода, [В]	1013
Ток магнитной катушки, [А]	79
Потенциал вытягивающей линзы, [В]	908
Потенциал линзы1, [В]	789
Потенциал линзы2, [В]	183
Потенциал линзы3, [В]	474
Потенциал отклоняющих плат1, [В]	- 21
Потенциал отклоняющих плат2, [В]	+ 10
Потенциал ВЭУ, [В]	- 3100

Эффективность детектора по газодинамическому пучку гелия является конечным параметром для сравнения рассматриваемых компоновочных схем и оценки их работы. Эта величина определялась как отношение разности сигнала и фона ионов с  $m/q = 4$  а.е.м. к полному числу атомов (интенсивность) газодинамического пучка попадающего в детектор. Определение интенсивности газодинамического пучка сводится к определению изменения давления в трубке Пито с проникающим в нее пучком и без. Изменение давления в трубке соответствует изменению интенсивности молекулярного пучка и, при перерасчете давления в число атомов газа можно получить зависимость интенсивности от давления торможения.

При давлении торможения  $P_0 = 3$  бар и температуре торможения  $T_0 = 300$  К, разность давлений в трубке Пито с пучком  $p_2$  и без пучка  $p_1$ , без снижения потока 50 мкм щелью, составляет

$$\Delta P_{TP} = p_2 - p_1 = 4.0 \times 10^{-10} \text{ мбар.}$$

С учетом поправок на сечение ионизации гелия и эффективной интенсивности пучка, которая составляла  $\approx 3 \cdot 10^9$  атом/с эффективность ионизатора составляет  $1 \cdot 10^{-3}$  ион/атом.

Экспериментальные результаты для всех рассмотренных конструкций детектора собраны в табл. 4.

Табл. 4. Чувствительность по газодинамическому пучку атомарного гелия для 4-х наиболее эффективных конструкций детектора. Типичное значение тока эмиссии для катода из торированного вольфрама составляло 10 мА; для диспенсерного катода это значение увеличивается до 25 мА.

Расстояние между катодом и анодом, L [мм]	Тип катода	Вытягивающая линза	Поток пучка в камеру детектора, [атом/сек]	Максимальный сигнал на массе 4 а.е.м., [Гц]	Фоновый сигнал на массе 4 а.е.м., [Гц]	Эффективность детектора, [Ио/атом]
55	торированный вольфрам	сталь	$3.1 \cdot 10^9$	$402 \cdot 10^3$	$171 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^{-5}$
		мю-металл	$4.3 \cdot 10^9$	$103 \cdot 10^3$	800	$2 \cdot 10^{-5}$
70	торированный вольфрам	сталь	$3.8 \cdot 10^9$	$472 \cdot 10^3$	130	$8 \cdot 10^{-4}$
95	торированный вольфрам	сталь	$3.1 \cdot 10^9$	$1.3 \cdot 10^6$	100	$4 \cdot 10^{-4}$
	диспенсерный	сталь	$3.1 \cdot 10^9$	$3.0 \cdot 10^6$	80	$1 \cdot 10^{-3}$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из полученных в ходе экспериментальных исследований данных можно сделать вывод, что исследуемая конструкция детектора с охлаждением деталей жидким азотом и расстоянием 95 мм между катодом и анодом, достигает эффективности ионизации газодинамического пучка состоящего из нейтральных атомов гелия с вероятностью не хуже, чем  $10^{-3}$ . Охлаждение сетки и анода до температуры жидкого азота уменьшает фон в детекторе за счет вымораживания остаточного газа. При этом значение фонового сигнала на массе атомарного гелия 4 а.е.м. составляет около 80 Гц, при сигнале, обусловленном газодинамическим пучком 3 МГц, что является несомненным достоинством детектора такого типа. Для стабильной работы детектора необходима тепловая развязка между охлаждаемыми деталями и катодом, обеспечивающая стабильность температуры нагрева последнего. В соответствии с данными по эффективности, приведенными в таблице 4, увеличение расстояния между катодом и анодом улучшает характеристики детектора с продольной ионизацией, но увеличивает ошибку времяпролетных измерений при небольших базах пролета частиц. Проведенные в работе исследования воздействия конической вытягивающей линзы из мю-металла не привели к увеличению чувствительности детектора, что может быть связано с несовершенством геометрии используемой линзы для проведения экспериментов с пучком прямоугольного сечения. Одной из последующих задач является моделирование и реализация вытягивающей линзы с усовершенствованной для такого вида экспериментов геометрией. Использование диспенсерного катода обеспечивает высокую стабильность и плотность тока эмиссии.

Разработанный источник ионов используется в составе детектора для анализа газодинамического пучка. Однако источник ионов такого вида может быть эффективно



использован в составе любого детектора с напуском исследуемых частиц молекулярным пучком, например, как ионизатор в квадрупольном масс-спектрометре. Для увеличения точности времяпролетных спектров интенсивных пучков длина области ионизации может быть в достаточной мере ограничена. Но эта модификация должна быть дополнительно исследована.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] В сб. «Исследования с молекулярными пучками»- Мир, 1969.
- [2] Русин Л. Ю. Экспериментальные методы исследования элементарных процессов в молекулярных пучках // Итоги науки и техники. – 1988. - № 18. – С. 109-216.
- [3] Pauly H. Streuexperimente mit Molekularstrahlen // Göttingen: Max-Planck-Institut für Strömungsforschung, 1988.
- [4] Scoles G. Atomic and molecular beam methods – New York: Oxford Univ. Press, 1988. – Vol. 1 and 2.
- [5] Rusin L. Yu. Comparison of experimental time-of-flight spectra of the HF products from the F+H<sub>2</sub> reaction with exact quantum mechanical calculations // L. Yu. Rusin, M. B. Sevryuk, J. P. Toennies // J. Chem. Phys. – 2005. – Vol. 122. – 134314 p.
- [6] Harten U. The observation of a soliton reconstruction of Au(111) by high resolution helium atom diffraction // U. Harten, A. Lahee, J. P. Toennies, Ch. Wöll // Phys. Rev. Lett. – 1985. – Vol. 54. – P. 2619-2622.
- [7] Kalinin A. Evidence for a bound HeH<sub>2</sub> halo molecule by diffraction from a transmission grating // J. Chem. Phys. – 2004. – Vol. 121 (2). – P. 625-627.
- [8] Weiss R. Molecular beam electron bombardment detector // Rev. Sci. Instrum. – 1961. – Vol. 32 (4). – P. 397-401.
- [9] Додонов А. Ф. Газофазные реакции в системе Н+О<sub>2</sub>+О<sub>3</sub> // А. Ф. Додонов, В. В. Зеленев, А. С. Кукуй, Е. А. Пономарев, В. Л. Тальрозе / Масс-спектрометрия и химическая кинетика / Москва: Наука, 1985. – С. 26-39.
- [10] Разников В. В. Выявление тонкой структуры кривых эффективности ионизации молекул, радикалов, возбужденных частиц электронами с тепловым энергетическим распределением // В. В. Разников, А. Ф. Додонов, В. В. Зеленев / Масс-спектрометрия и химическая кинетика / Москва: Наука, 1985. – С. 129-137.
- [11] Bickes R.W. A versatile molecular beam scattering apparatus utilizing electron bombardment detection // R. W. Bickes, R. B. Bernstein / Rev. Sci. Instrum. – 1970. – Vol. 41 (5). – P. 759-768.
- [12] Brink G.O. Electron bombardment molecular beam detector // Rev. Sci. Instrum. – 1966. – Vol. 37 (7). – P. 857-860.
- [13] Lee Y.T. et al. Molecular beam reactive scattering apparatus with electron bombardment detector // Y. T. Lee, J. D. McDonald, P. R. LeBreton, D. R. Herschbach // Rev. Sci. Instrum. – 1969. – Vol. 40 (11). – P. 1402-1408.
- [14] Amirav A. et al. Improved electron ionization ion source for the detection of supersonic molecular beams // A. Amirav, A. Fialkov, A. Gordin // Rev. Sci. Instrum. – 2002. – Vol. 73 (8). – P. 2872-2876.
- [15] Lantzsch B. Messung der Geschwindigkeitsabhängigkeit integraler Querschnitte für die Streuung eines thermischen H-Strahls an Edelgasen und leichten Molekülen und Bestimmung der Wechselwirkungspotentiale: Ph.D. thesis / MPI für Strömungsforschung. – Göttingen, Deutschland, 1974.
- [16] DeKieviet M. et al. Design and performance of a highly efficient mass spectrometer for

molecular beams // M. DeKieviet, D. Dubbers, M. Klein, U. Pieles, C. Schmidt // Rev. Sci. Instrum. – 2000. – Vol. 71 (5). – P. 2015-2018.

[17] McDowell C. A. Mass Spectrometry. – New York: McGraw-Hill Book Company, 1963.

[18] Ardenne M. v. Tabellen zur Angewandten Physik. – Berlin: Veb Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1962. – Vol. 2. – 21 p.