

УДК 537. 533. 3

© Н. В. Краснов, М. З. Мурадымов, Ю. И. Хасин

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ИОНИЗАЦИИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИОННОГО ПУЧКА, ФОРМИРУЕМОГО ИСТОЧНИКОМ ИОНОВ С ИОНИЗАЦИЕЙ ЭЛЕКТРОННЫМ УДАРОМ

Экспериментально исследовались геометрические параметры ионного пучка, выходящего из ионизационной камеры источника ионов с ионизацией электронным ударом, в зависимости от давления газа, ионизирующего напряжения, тока ионизирующих электронов и геометрии диафрагмы вытягивающего электрода. Экспериментальные результаты показывают, что угловые распределения ионного пучка, эмитируемого ионизационной камерой, слабо зависят от названных параметров в широком диапазоне их значений.

При создании любого масс-спектрометра разработка источника ионов является одним из самых проблемных и трудоемких этапов. Сама процедура получения ионов, когда анализируемое вещество может быть в любом агрегатном состоянии, представляет сегодня разветвленное направление фундаментальной и прикладной науки. Многие вопросы образования ионов недостаточно исследованы, множество параметров известны с требуемой точностью лишь для узкого круга сравнительно простых веществ.

Источник ионов с ионизацией электронным ударом (ЭУ) является не только самым распространенным типом масс-спектрометрического источника, но одновременно и тем типом источника, к аналитическим характеристикам которого предъявляются предельно высокие требования. Связано это, в частности, с тем, что масс-спектрометрия электронного удара является методом количественного анализа во многих приложениях, масс-спектры электронного удара составляют основу библиотек масс-спектров, а источник ионов ЭУ в подавляющем большинстве случаев является тестовым источником, с которым масс-спектрометр настраивается и фиксируются его аналитические характеристики.

Совершенствование моделей процессов ионообразования, формирования ионных пучков и их прохождения через ионно-оптическую систему масс-анализатора привело к существенному повышению доли используемых ионов, т.е. чувствительности масс-спектрометрических приборов. К примеру, в работе [1] на четвертой странице источник ионов и ионно-оптическая система масс-спектрометра МАТ-90 характеризуются тем, что до 40 % ионов, образовавшихся в источнике ионов ЭУ, детектируются на приемнике. При этом общая теория электронной и ионной оптики оказывает

лишь ограниченную помощь разработчикам ионных источников [2]. Основные и принципиальные трудности связаны с той частью ионно-оптической системы источника ионов ЭУ, которую обычно называют ионизационной камерой. Причина состоит в том, что "объектом" для последующей оптической системы в источнике ионов ЭУ является область электронного пучка, в которой образуются ионы. Ситуация осложняется тем, что эта область находится в электрическом и магнитном полях, а кроме того, суммарный объемный заряд электронов и ионов может заметно изменять действующее электрическое поле в самой области. В результате и по сей день не существует всесторонней теории или даже хорошо разработанной методологии конструирования ионных источников. Существующие программные средства позволяют вполне достоверно моделировать всю ионно-оптическую систему источника ЭУ, кроме области ионизационной камеры и вытягивающего электрода.

Одной из разработанных и неплохо себя зарекомендовавших оптических систем источников ионов ЭУ является система с вытягиванием ионов однородным электрическим полем [3].

МОДЕЛЬ ОДНОРОДНОГО ВЫТЯГИВАНИЯ ИОНОВ

На простой модели проанализируем процесс выхода ионов из ионизационной камеры источника ионов ЭУ. Обычно для реализации условий однородности вытягивающего поля отсоединяют от ионизационной камеры ее верхнюю крышку и подают на нее потенциал относительно ионизационной камеры. В нашей модели мы будем пренебрегать искажениями электростатического поля, связанными с влиянием электронного пучка,

с проникновением поля через выходную щель и с влиянием магнитного поля фокусирующих магнитов. Предположение об однородности вытягивающего поля позволяет некоторые оценочные характеристики пучка получить аналитически.

На рис. 1 приведена расчетная схема источника ионов и принятые обозначения. Ионный пучок образуют лишь те ионы из всех, образующихся в ионизационной камере, которые попадают в щель на вытягивающем электроде с размерами $2a \times 2b$.

Траектория движения образовавшегося иона описывается уравнением (1):

$$\ddot{\mathbf{r}} = \frac{e}{m} \mathbf{E}, \quad (1)$$

где: $\frac{e}{m}$ — отношение массы электрона к массе иона; $\mathbf{E}$ — напряженность электрического поля в ионизационной камере.

При принятых предположениях относительно характера электрического поля $\mathbf{E}$ можно уравне-

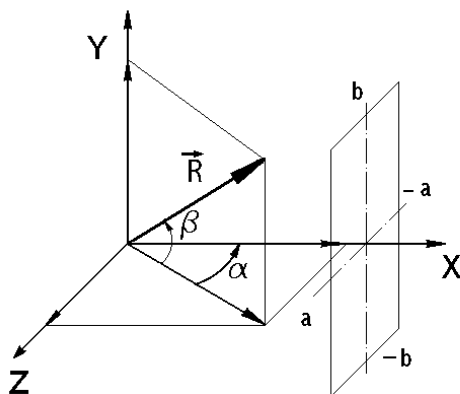
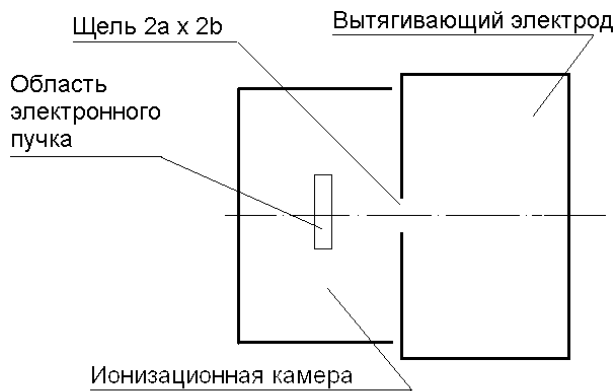


Рис. 1. Расчетная схема ионизационной камеры и принятая система координат; диафрагма в вытягивающем электроде $2a \times 2b$

ние (1) переписать в виде проекций на координатные плоскости (2):

$$\begin{cases} \ddot{X} = \frac{e}{m} \cdot E_x = \frac{e}{m} E, \\ \ddot{Y} = \frac{e}{m} \cdot E_Y = 0, \\ \ddot{Z} = \frac{e}{m} \cdot E_Z = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Решив систему уравнений (2) и исключив время, можно получить систему уравнений (3):

$$\begin{cases} X = \frac{eE}{2m} \frac{(y - y_0)^2}{V_{y_0}^2} + \frac{V_{x_0}}{V_{y_0}} \cdot (y - y_0) + x_0, \\ X = \frac{eE}{2m} \frac{(z - z_0)^2}{V_{z_0}^2} + \frac{V_{x_0}}{V_{z_0}} \cdot (z - z_0) + x_0, \end{cases} \quad (3)$$

где x_0 , y_0 и z_0 — начальные координаты ионов; V_{x_0} , V_{y_0} и V_{z_0} — компоненты начальной скорости ионов.

Подставив в систему (3) выражения

$$V_{x_0} = \dot{R}_0 \cdot \cos \alpha_0 \cdot \cos \beta_0, \quad V_{y_0} = \dot{R}_0 \cdot \sin \beta_0,$$

$$V_{z_0} = \dot{R}_0 \cdot \cos \beta_0 \cdot \sin \alpha_0,$$

$$\begin{aligned} \frac{m \dot{R}_0^2}{2} &= eU_0 = \frac{m V_{y_0}^2}{2 \sin^2 \beta_0} = \\ &= \frac{m V_{z_0}^2}{2 \cos^2 \beta_0 \cdot \sin^2 \alpha_0}, \end{aligned}$$

где U_0 — потенциал, соответствующий начальной энергии иона; $\cos \alpha_0$ и $\cos \beta_0$ — начальные углы (см. рис. 1), получим:

$$\begin{cases} \frac{E(y - y_0)^2}{4U_0 \sin^2 \beta_0} + \frac{\cos \beta_0 \cos \alpha_0}{\sin \beta_0} (y - y_0) + \\ + (x - x_0) = 0, \\ \frac{E(z - z_0)^2}{4U_0 \cos^2 \beta_0 \sin^2 \alpha_0} + \frac{\cos \alpha_0}{\sin \alpha_0} (z - z_0) + \\ + (x - x_0) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Система (4) содержит уравнения, описывающие проекции траектории движения иона на плоскости XY и XZ ; ион начинает движение в точке с координатами $\{x_0, y_0, z_0\}$, имеет начальную энергию, соответствующую потенциалу U_0 , а проекции начальной скорости на соответствующие плоскости определяются углами α_0 и β_0 . Подобные уравнения использовались в работе [3], в которой описы-

вается источник ионов с вытягиванием ионов однородным электрическим полем.

Из уравнений (4) нетрудно получить предельные значения углов, которые составит проекция траектории иона, выходящего из ионизационной камеры в бесполовое пространство, на соответствующие плоскости.

В плоскости XY :

$$\operatorname{tg} \theta_y = \frac{1}{\sqrt{\frac{U_{\text{выт}}(d - x_0)}{U_0 \cdot d}}} \quad (5)$$

В плоскости XZ :

$$\operatorname{tg} \theta_z = \frac{1}{\sqrt{\frac{U_{\text{выт}}(d - x_0)}{U_0 \cdot d}}} \quad (6)$$

где d — это размер ионизационной камеры в направлении оси X , $U_{\text{выт}}$ — вытягивающее напряжение.

В рамках рассмотренной простой модели углы оказываются независимыми от размеров выходной щели, т.е. они одинаковы в обеих плоскостях симметрии пучка. На рис. 2 приведен график изменения величины угла выхода ионов из ионизационной камеры в зависимости от вытягивающего напряжения (кривая помечена "плоская модель, угол θ "). Кривая построена для значения $x_0 = 3$ мм.

В реальной ионизационной камере источника ЭУ однородность электрического поля искажается по многим причинам. Среди этих причин: искаже-

ние поля вблизи щели в вытягивающем электроде, влияние провисающих в ионизационную камеру полей от катода и коллектора электронов, поле объемного заряда самих электронов и, вообще говоря, объемного заряда уже образовавшихся, но еще не покинувших ионизационную камеру ионов. При этом электроны и образовавшиеся ионы движутся под действием наложенных результирующего электрического и магнитного полей. В результате углы выхода ионов из ионизационной камеры в той или иной мере будут отличаться от величин, следующих из модели плоского поля.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОНИЗАЦИОННОЙ КАМЕРЫ ИСТОЧНИКА ЭУ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ "SIMION"

Программа позволяет достаточно достоверно построить объемную модель ионизационной камеры и рассчитать трехмерное электрическое поле в ней. Кроме того, программа позволяет смоделировать и рассчитать магнитное поле фокусирующих магнитов и осуществить наложение полей. Таким образом, подобная модель учитывает все перечисленные выше причины нарушения однородности электрического поля, кроме влияния объемного заряда. С помощью программы "SIMION" была создана модель ионизационной камеры с вытягивающим электродом. Размеры и потенциалы в модели соответствовали размерам и потенциалам реальной ионизационной камеры. Потенциал катода равнялся -70 В, потенциал коллектора электронов был равен $+50$ В (значения потенциалов указаны относительно ионизационной камеры). Магнитное поле, фокусирующее электронный пучок, составляло 60 Гс. Для определения угла вылета ионов из ионизационной камеры задавалась трехмерная область возникновения ионов, диапазоны начальных углов ионов и диапазон начальных энергий. В заданных диапазонах начальных координат, углов и энергий разыгрывались $5-10$ тысяч траекторий ионов. На выходе из ионизационной камеры строилось распределение вышедших ионов по углу в двух плоскостях симметрии. За меру углового разброса принималась половина ширины углового распределения, измеренная на половине его высоты. На рис. 2 приведены графики зависимости углового разброса ионного пучка в горизонтальной (угол α) и вертикальной (угол β) плоскостях, определенные таким образом (кривые помечены "SIMION"). Хорошо видно, что ширина распределений разная в двух плоскостях симметрии, т.е. зависит от размера диафрагмы в вытягивающем электроде. Из приведенных графиков следует, что в вертикальной плоскости (угол β) значения углов удовлетворительно согласуются с результатами, полученными в рамках плоской модели. В гори-

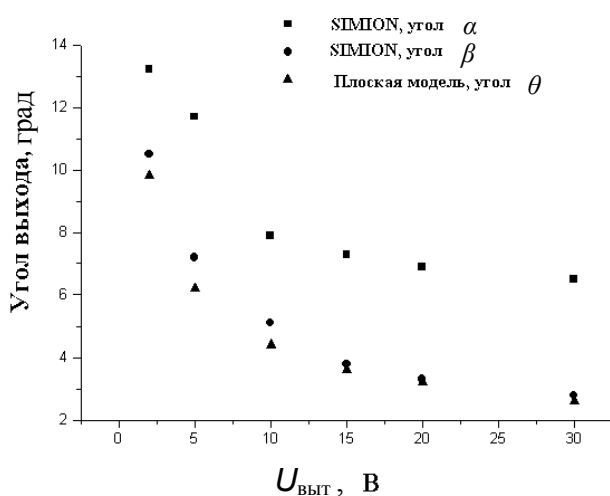


Рис. 2. Расчетные зависимости ширины углового распределения ионного пучка от вытягивающего напряжения $U_{\text{выт}}$

зонтальной же плоскости (угол α) расхождение с данными плоской модели велико. Причиной этого, по-видимому, является провисание электростатического поля через диафрагму в вытягивающем электроде.

В реальном источнике ионов ЭУ угловое распределение пучка ионов, покидающих ионизационную камеру, формируется, испытывая влияние дополнительных факторов. Среди них — уже упоминавшееся электрическое поле совокупного объемного заряда электронов и ионов, неоднородность плотности пучка ионизирующих электронов и некоторые другие. Угловые параметры ионного пучка на выходе из ионизационной камеры источника ионов были измерены экспериментально.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И УСЛОВИЙ ИЗМЕРЕНИЙ

Для определения начальных условий (параметров) пучка ионов, извлекаемых из ионизационной камеры источника ионов, была использована экспериментальная установка, представленная на рис. 3. В вакуумной камере (1), состоящей из двух

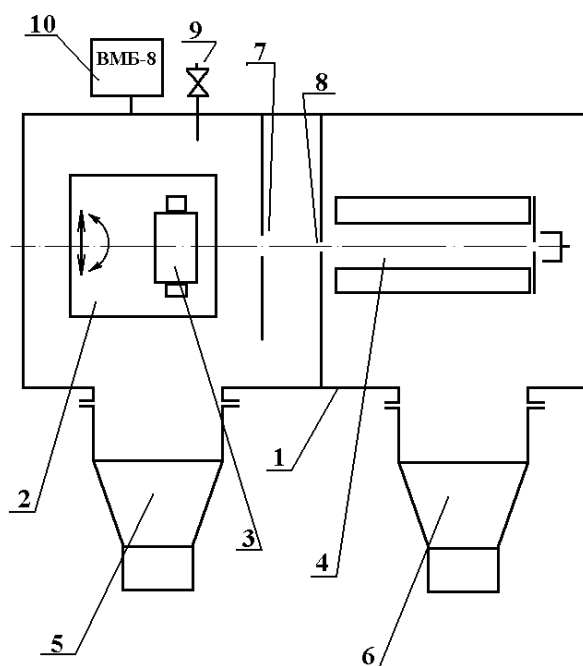


Рис. 3. Схема экспериментальной установки. 1 — вакуумная камера; 2 — поворотное устройство; 3 — ионизационная камера; 4 — квадрупольный масс-анализатор МС 7302; 5, 6 — вакуумный насос НПМ 07; 7 — вакуумное бесполое пространство; 8 — диафрагма; 9 — газовый вентиль; 10 — вакуумметр ВМБ 1/8-001

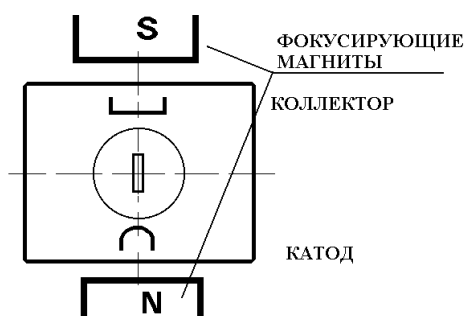


Рис. 4. Схема исследуемой ионизационной камеры

секций, располагались двухкоординатное устройство (2) с исследуемой ионизационной камерой (3) — первая секция и квадрупольный масс-анализатор МС 7302 (4) — вторая секция. Каждая секция откачивалась отдельным высоковакуумным диффузионным паромасляным насосом НПМ 07 (5), (6). Секции разделялись вакуумно-плотно, а пучок ионов, вышедший из источника ионов, попадал в бесполое пространство (7) и через диафрагму (8) — в масс-анализатор. Через вентиль тонкой регулировки (9) в ионизационную камеру производился напуск газа. Давление подаваемого газа в области ионизационной камеры контролировалось при помощи вакуумметра ВМБ 1/8-001 (10).

Регистрация экспериментальных результатов осуществлялась на двухкоординатном самописце Н-306, при этом квадрупольный анализатор настраивался на пропускание и регистрацию одного заранее выбранного иона, что позволило построить угловые распределения ионов в зависимости от условий эксперимента в координатах интенсивность (для выбранного отношения m/e)—угол. Из полученных угловых распределений на полувысоте распределения определялась полуширина и строилась соответствующая зависимость от исследуемого параметра. Схема стандартной ионизационной камеры, использованной в экспериментах, представлена на рис. 4. Геометрические соотношения, определяющие область измерения, приведены на рис. 5. Ионизационная камера (3 на рис. 3) закреплялась на координатном устройстве (2 на рис. 3) таким образом, что ось поворота проходила через плоскость вытягивающего электрода. Расстояние R от плоскости вытягивающего электрода до входной диафрагмы масс-анализатора (4 на рис. 3) составляло 70 мм. При диаметре входной диафрагмы 3 мм угловое разрешение системы составляло 2.5° ; эту величину можно было уменьшить в три раза, используя входную диафрагму масс-анализатора диаметром 1 мм.

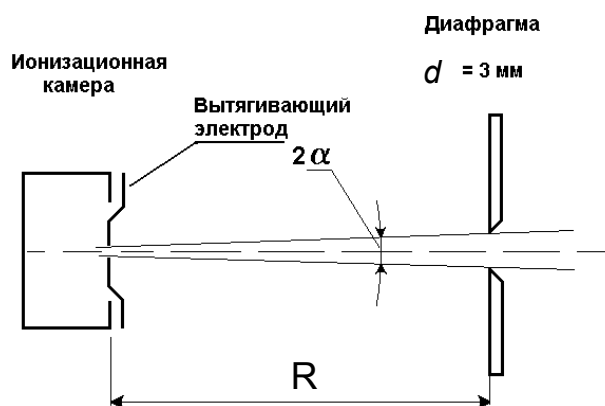


Рис. 5. Схема расположения основных элементов; $R = 70$ мм

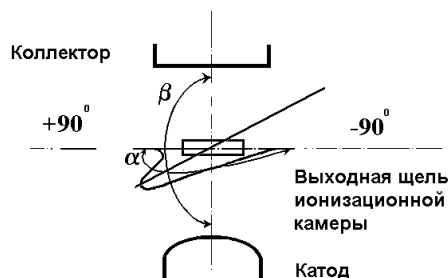


Рис. 6. Схема измерений углов

Координатное устройство позволяло производить перемещение ионизационной камеры с вытягивающим электродом по осям X и Y и вращение по углу вокруг этих осей. На рис. 6 представлена схема измерения по углам и координатам, использованная в экспериментах настоящей работы.

Измерение характеристик ионного пучка, выходящего из ионизационной камеры, проводилось в зависимости от давления газа в области ионизации в пределах от 10^{-4} до 10^{-2} Па, тока катода от 10 до 310 мкА, ионизирующего напряжения от 50 до 90 В, вытягивающего напряжения от 2 до 20 В, сорта газа, геометрии выходной щели в вытягивающем электроде.

Для удобства схема питания ионизационной камеры была выбрана таким образом, что плюс вытягивающего напряжения и вытягивающий электрод присоединялись к "земле", а к ионизационной камере присоединялся минус вытягивающего напряжения. Такая схема позволяет выводить пучок из ионизационной камеры в дрейфовое пространство. Как правило, вытягивающий электрод имел диафрагму прямоугольной формы, так назы-

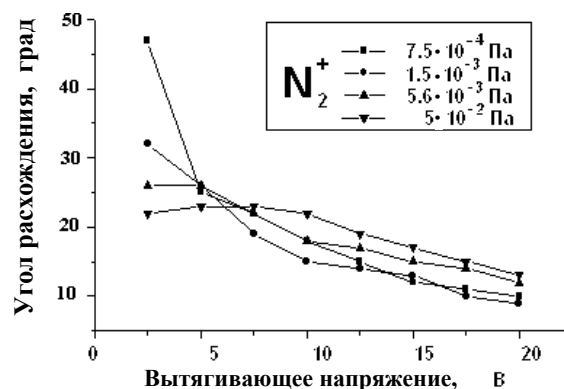


Рис. 7. Зависимость углового расхождения пучка ионов молекулярного азота от вытягивающего напряжения при разных давлениях

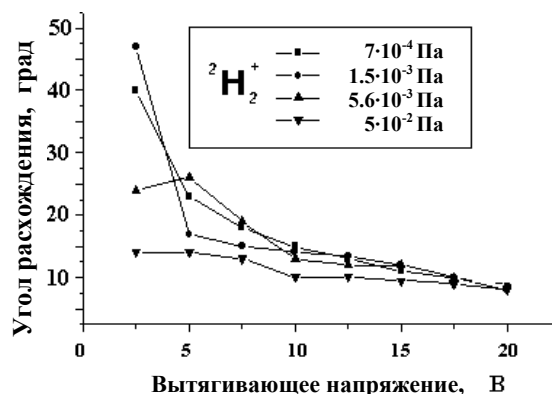


Рис. 8. Зависимость углового расхождения пучка ионов молекулярного водорода от вытягивающего напряжения при различных давлениях

ваемую выходную щель, шириной 1 мм и высотой 4 мм. Кроме того, изменялась геометрия отверстия в вытягивающем электроде ионизационной камеры. Так, в экспериментах использовались как квадратное отверстие размером 4×4 мм, так и круглое отверстие диаметром 2 мм, расположенные по центру электрода. Изучение характеристик ионного пучка проводилось на примере иона азота N_2^+ с $m/e = 28$. Кроме того, измерялись угловые характеристики пучков ионов водорода, неона, аргона, криптона и некоторых других газов. Множественность и недостаточная одновременная контролируемость параметров, определяющих процесс ионообразования и выхода ионов, позволяют говорить о полуколичественности результатов исследований. Для более достоверного сравнения

полученных зависимостей от внешних параметров в настоящей работе учитываются только значения, превышающие 10 % порог от максимума каждой отдельно взятой зависимости.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Пучок ионов, формирующийся в реальной ионизационной камере (с принятыми размерами и взаимным расположением отдельных частей) источника ионов ЭУ, испытывает на себе результирующее влияние следующих основных факторов:

- напряжение на вытягивающем (выталкивающем) электроде;
- ионизирующее напряжение (определяет энергию электронов);
- ток ионизирующих электронов;
- давление анализируемых газов в области ионизации;
- эффективное значение напряженности фокусирующего магнитного поля.

В наших экспериментах магнитное поле создавалось с помощью постоянных магнитов и не изменялось. Напряженность магнитного поля в центральной области ионизационной камеры составляла 50–60 Гс. Конструкция и режимы работы электронной пушки таковы, что электроны, эмитируемые катодом, практически не попадали на ионизационную камеру и без потерь достигали коллектор. Контроль за режимом работы электронной пушки осуществлялся по току на коллекторе электронов (10–310 мкА) и по величине тока на ионизационную камеру, который при нормальных условиях должен быть близок к нулю. Заметное возрастание тока электронов на ионизационную камеру было сигналом к замене катода.

Полученные экспериментальные данные во всех использованных диапазонах изменяющихся параметров (см. рис. 7–12) демонстрируют справедливость представления о том, что рост вытягивающего напряжения вызывает во всех случаях уменьшение углового разброса формируемого ионного пучка. Однако угловой разброс реального пучка ионов во всех случаях превышает значения, получающиеся из теоретического рассмотрения. В области малых значений $U_{\text{выт}}$ это расхождение весьма значительно, однако и при сравнительно больших значениях $U_{\text{выт}}$ (20 В) значения углов расходятся в 2–3 раза (рис. 7). На такой характер зависимости не влияет (в пределах воспроизводимости экспериментальных данных) масса ионов. Так, данные, приведенные на рис. 9 для ионов криптона $^{84}\text{Kr}^+$, мало отличаются по характеру и значениям от данных рис. 8, снятых для ионов водорода H_2^+ .

В диапазонах изменяемых экспериментальных параметров с ростом давления ионизируемого газа

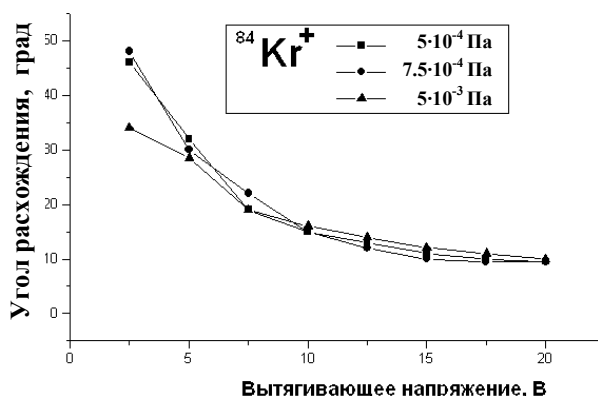


Рис. 9. Зависимость углового расхождения пучка ионов изотопа криптона $^{84}\text{Kr}^+$ от вытягивающего напряжения при различных давлениях. Ток электронов $I_{\text{э}} = 70$ мкА

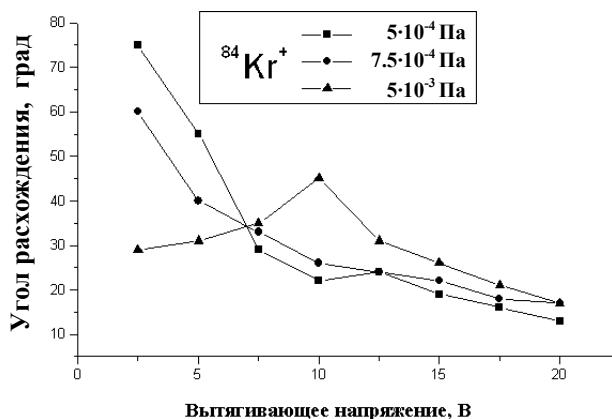


Рис. 10. Зависимость углового расхождения пучка ионов изотопа криптона $^{84}\text{Kr}^+$ от вытягивающего напряжения при различных давлениях. Ток ионизирующих электронов $I_{\text{и}} = 310$ мкА

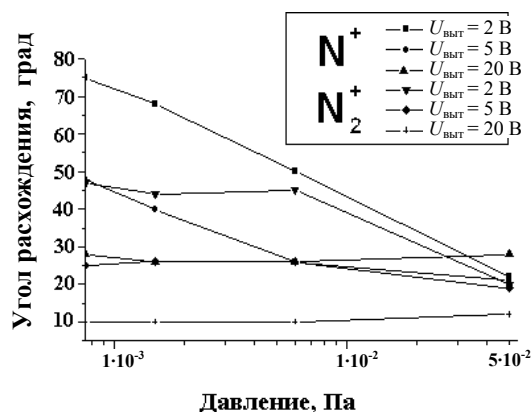


Рис. 11. Зависимость углового расхождения пучков ионов молекулярного N_2^+ и атомарного N^+ азота от давления при различных вытягивающих напряжениях $U_{\text{выт}}$

происходит уменьшение углового разброса формируемого пучка ионов. Основным фактором при этом является действие электрического поля положительного объемного заряда образующихся ионов. Эти ионы компенсируют частично отрицательный объемный заряд электронного пучка и выравнивают распределение электрического потенциала в области образования ионов. При повышенных давлениях газа, увеличении тока электронов и небольших вытягивающих напряжениях возможна даже перекомпенсация объемного заряда, т.е. доминирует влияние поля положительного объемного заряда. Влияние поля объемного заряда в ионизационной камере в области образования и выхода ионов может изменять угловые характеристики формируемого ионного пучка и даже быть причиной появления особенностей в угловых распределениях (см. рис. 10).

Влияние начальных скоростей ионов на угол расхождения ионного пучка можно проиллюстрировать, сравнивая результаты измерения угловых распределений ионов молекулярного азота N_2^+ ($m/e = 28$) и диссоциативных атомарных ионов N^+ ($m/e = 14$) (см. рис. 11). Ионы N_2^+ имеют начальные энергии, близкие к тепловой, а ионы N^+ могут иметь значительные начальные кинетические энергии, возникающие при распаде иона N_2^+ . Разница в начальных кинетических энергиях ионов наиболее рельефно должна проявляться при малых напряжениях на вытягивающем электроде. В соответствии с таким представлением при $U_{\text{выт}} = 2$ В угловой разброс пучка ионов N^+ почти в полтора раза превышает угловой разброс пучка ионов N_2^+ при одинаковых всех условиях эксперимента (перестраивается только квадрупольный масс-анализатор на регистрацию той или иной массы). Следует отметить что, при большом напряжении $U_{\text{выт}}$ (20 В) эта разница увеличивалась. Увеличение давления газа "фокусирует" и молекулярные и диссоциативные ионы при малых значениях $U_{\text{выт}}$ (2 В). При увеличении в этих условиях вытягивающего напряжения до 20 В угловой разброс молекулярных ионов уменьшается, а угловой разброс ионов N^+ даже немного увеличивается.

Стабилизирующая роль положительных ионов в ионизационной камере источника ионов отражается на виде зависимости углового разброса ионов от величины ионизирующего напряжения. В источнике ЭУ ионизирующее напряжение определяет энергию электронов. Но при этом неконтролируемо может меняться и форма, и плотность электронного пучка, могут меняться и условия компенсации объемного заряда. На рис. 12 приведен ход зависимости углового разброса пучка от ионизирующего напряжения при сравнительно низком давлении $5 \cdot 10^{-4}$ Па для ионов азота N_2^+ . Можно отметить и достигающий до 70° угловой разброс

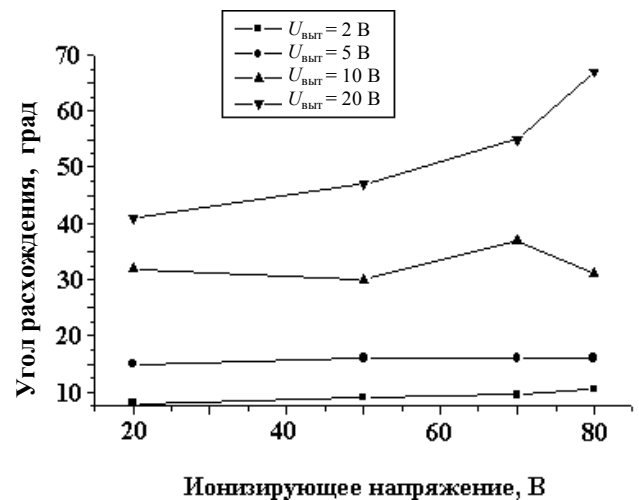


Рис. 12. Зависимость углового расхождения пучка ионов молекулярного азота от ионизирующего напряжения при давлении $5 \cdot 10^{-4}$ Па

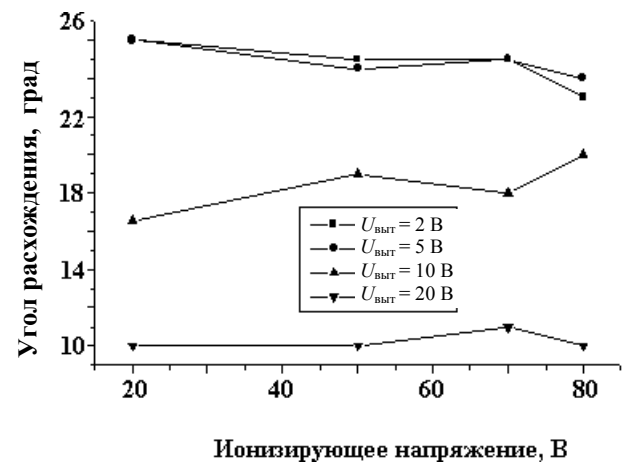


Рис. 13. Зависимость углового расхождения пучка ионов молекулярного азота от ионизирующего напряжения при давлении $1.5 \cdot 10^{-2}$ Па

пучка, и увеличение углового разброса с ростом ионизирующего напряжения при $U_{\text{выт}} = 2$ В. На рис. 13 приведена та же самая зависимость, но снятая при давлении азота $1.5 \cdot 10^{-2}$ Па. При этом не только уменьшился угловой разброс пучка, но он практически перестал зависеть от ионизирующего напряжения.

Угловые разбросы пучка в вертикальной плоскости (угол β) в основном и качественно по-

вторяют зависимости от названных параметров в горизонтальной плоскости (угол α). По величине угловой разброс ионного пучка в вертикальной плоскости также сравним с разбросом в горизонтальной плоскости. Ширина распределения интенсивности ионного пучка в вертикальной плоскости составляла приблизительно 30° при изменении внешних параметров в выше приводимых диапазонах.

Следует заметить, что при изменении регулируемых величин происходит соответствующее изменение интенсивности ионного пучка. Так, рост тока электронов и давления анализируемого газа приводит к почти пропорциональному увеличению интенсивности ионного тока с отмеченными выше изменениями углового распределения ионного пучка. А увеличение вытягивающего напряжения всегда сопровождается немонотонным изменением величины ионного тока. Как правило, величина ионного тока достигала максимальной величины при $U_{\text{выт}} = 8\text{--}12\text{ В}$, а при дальнейшем увеличении $U_{\text{выт}}$ ионный ток уменьшался. Например, наблюдалось уменьшение тока ионов азота N_2^+ при увеличении $U_{\text{выт}}$ с 10 до 20 В в четыре раза при несущественном сужении углового разброса.

Одной из причин нарушения пропорциональности ионного тока источника ЭУ при изменении тока электронов может быть форма углового распределения ионного пучка, выходящего из ионизационной камеры. Результаты измерения зависимости интенсивности ионного пучка для двух значений величины электронного тока в трехмерных координатах (α, β, I^+), где I^+ — ионный ток, представлены на рис. 14 для тока электронов $I_e = 150\text{ мкА}$ и $I_e = 250\text{ мкА}$ и $U_{\text{выт}} = 10\text{ В}$. Приведенные распределения имеют характерную форму с двумя, а то и тремя максимумами. Увеличение электронного тока приводит к существенному (3–5 раз) уширению двугорбого распределения интенсивности ионного пучка по углу α с перекачкой интенсивности по углу β без изменения координат максимумов интенсивности. При замене прямоугольной щели вытягивающего электрода на квадратное отверстие ($4 \times 4\text{ мм}$) распределение интенсивности ионного пучка по углу α во всем диапазоне использованных значений I_e имеет всегда одногорбое распределение.

ВЫВОДЫ

Полученные в данной работе результаты позволяют сделать заключение, что современные требования к аналитическим характеристикам источника ЭУ превышают модельные представления о плоском вытягивающем поле в ионизационной камере с отсоединенной от камеры верхней крыш-

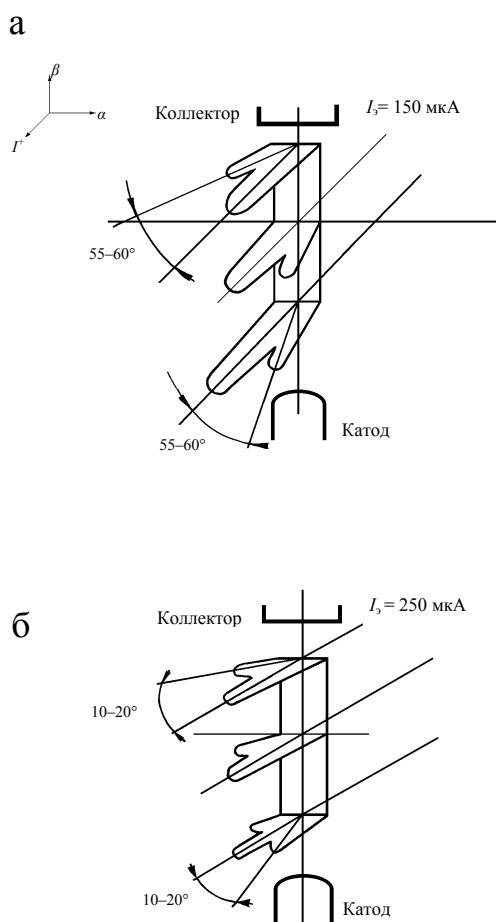


Рис. 14. Зависимости интенсивности ионного тока (ионы N_2^+), измеренные в горизонтальной и вертикальной плоскостях при двух значениях тока ионизирующих электронов: $I_e = 150\text{ мкА}$ (а), $I_e = 250\text{ мкА}$ (б); вытягивающее напряжение $U_{\text{выт}} = 10\text{ В}$

кой, на которую подается вытягивающее напряжение. Тенденция сужения углового разброса ионного пучка при увеличении $U_{\text{выт}}$ подтверждается, но реальные значения углов превышают теоретические в два-три раза.

Отклонения от однородного электрического поля, вызванные провисанием поля в области ионной щели, прохождением электронного пучка, полем объемного заряда образующихся ионов и другими факторами, являются причинами возникновения таких особенностей процесса формирования ионного пучка, которыми нельзя пренебречь.

Среди таких особенностей одной из важнейших является фокусирующее и стабилизирующее действие объемного заряда ионов в области электронного пучка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Brunnee Curt*. New Approaches to Analyzer and Instrument Control: Technical Report № 434. Ohio, USA, Finnigan MAT Users Forum in Cincinnati, June 1986. 17 p.
2. *Силадьи М.* Электронная и ионная оптика. М.: Мир, 1990. 639 с.
3. *Комаров М. С.* Источник ионов с однородным вытягивающим полем, количественная оценка

основных технических характеристик // Тезисы III Всесоюзной конф. по масс-спектрометрии. Л.: Изд-во АН СССР, 1981. С. 254.

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург

Материал поступил в редакцию 2.03.2001.

STUDY OF THE EFFECT OF IONIZATION CONDITIONS ON THE CHARACTERISTICS OF THE ION BEAM FORMED BY AN ELECTRON IMPACT ION SOURCE

N. V. Krasnov, M. Z. Muradymov, J. I. Khasin

Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg

Geometrical parameters of the ion beam leaving the ionization chamber of an electron impact ion source have been experimentally studied as a function of gas pressure, ionization voltage, ionization electron current and extraction electrode diaphragm geometry. The experimental results show that the angular distributions of the ion beam emerging from the ionization chamber little depend on the parameters listed above in a wide range of their values.