

PACS number: 07.75.+h

**РАСЧЁТ СИСТЕМЫ ФОКУСИРОВКИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА  
В ИОННОМ ИСТОЧНИКЕ МАСС-СПЕКТРОМЕТРА С ИОНИЗАЦИЕЙ  
ЭЛЕКТРОННЫМ УДАРОМ**

*А.С. Кузема*<sup>1</sup>, *П.А. Кузема*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Сумский национальный аграрный университет,  
ул. Кирова, 160, 40021, Сумы, Украина  
E-mail: [admin@sau.sumy.ua](mailto:admin@sau.sumy.ua)

<sup>2</sup> Институт химии поверхности им. А.А. Чуйко НАН Украины,  
ул. Генерала Наумова, 17, 03164, Киев, Украина

*Получены соотношения для параметров траектории электрона и определена величина индукции магнитного поля в области ионизационной камеры, при которой обеспечивается прохождение электронного пучка через пространство ионизационной камеры без его уширения.*

**Ключевые слова:** МАСС-СПЕКТРОМЕТР, ИСТОЧНИК ИОНОВ, ИОНИЗАЦИОННАЯ КАМЕРА, МАГНИТНОЕ ПОЛЕ, ЭЛЕКТРОННЫЙ ПУЧОК.

*(Получено 31.03.2011, опубликовано online – 05.11.2011)*

Источники ионов с ионизацией газообразных веществ медленными электронами получили достаточно широкое распространение в масс-спектрометрии. Ионизация в них осуществляется электронным пучком малой энергии (~ 100 эВ) с образованием ионов за счёт столкновения электронов с молекулами и атомами исследуемого вещества. Такие источники ионов формируют стабильные моноэнергетические ионные пучки интенсивностью  $10^{-8}$ - $10^{-9}$  А и позволяют легко управлять ионизирующим электронным током и энергией ионизации [1-3]. В тех случаях, когда необходимо повысить эффективность ионизации без увеличения тока ионизирующих электронов, используют магнитное поле. Ниже изложена методика расчёта системы фокусировки электронного пучка в ионном источнике с ионизацией электронным ударом при наличии магнитного поля в камере ионизации.

Типичная схема ионизатора пучком медленных электронов показана на рис. 1. Электроны, эмитируемые накаливаемым катодом 1, ускоряются в направлении ионизационной камеры 2 под воздействием ионизирующего напряжения, приложенного между катодом и камерой ионизации. Часть пучка проходит через коллимирующую щель в камере ионизации и затем через симметричную ей выходную щель попадает на коллектор электронов 3. Электронный пучок дополнительно фокусируется продольным магнитным полем, которое увеличивает длину пролета электронов за счёт поперечной составляющей их скорости и, следовательно, повышает вероятность ионизации. Ионы, образовавшиеся в области прохождения электронного пучка в ионизационной камере, выходят из нее через боковую щель и формируются в ионный пучок

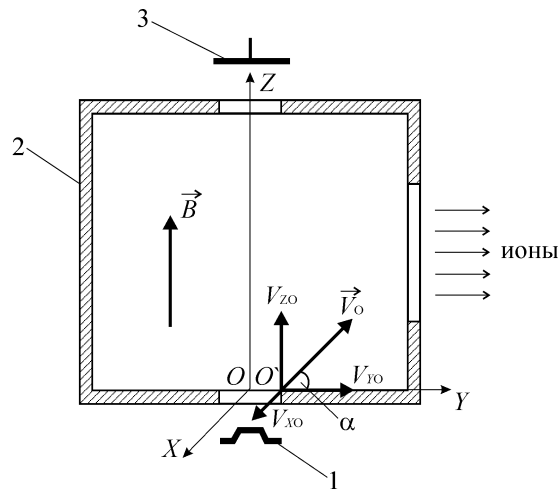


Рис. 1 – Схема ионизатора и расположение системы координат

ионной пушкой (на рисунке не показана). Необходимо, чтобы электронный пучок, проходя пространство ионизационной камеры, не задевал ее стенок, что может быть достигнуто за счёт соответствующего выбора продольного магнитного поля, фокусирующего электронный пучок. Определим, в связи с этим, параметры траектории электрона и величину магнитной индукции в камере ионизации, при которой указанное выше требование выполняется.

Значения геометрических и физических параметров электронной пушки выберем такими, которые наиболее часто используются в масс-спектрометрах [2, 3]: ширина ленточного катода 0,5 мм; расстояние от катода до ионизационной камеры 1 мм; размеры щели в ионизационной камере для прохождения электронного пучка 1 × 1 мм; величина ионизирующего напряжения 70 В.

Для решения поставленной задачи воспользуемся уравнениями движения электрона в магнитном поле, поскольку в области ионизационной камеры электрическое поле равно нулю. Воспользуемся также прямоугольной системой координат и выберем направление её осей таким образом, как это показано на рис. 1.

Уравнения движения электрона в выбранной нами системе координат, если ее начало помещено в точке O, имеют вид [4]

$$X - \frac{m}{eB} V_{YO} = -\frac{mV_{YO}}{eB} \cos \frac{eB}{m} t + \frac{mV_{XO}}{eB} \sin \frac{eB}{m} t; \quad (1)$$

$$Y + \frac{m}{eB} V_{XO} = \frac{mV_{YO}}{eB} \sin \frac{eB}{m} t + \frac{mV_{XO}}{eB} \cos \frac{eB}{m} t; \quad (2)$$

$$Z = V_{ZO} t; \quad (3)$$

где  $m$  и  $e$  – масса и заряд электрона, соответственно;  $B$  – индукция магнитного поля в камере ионизации;  $V_{XO}$ ,  $V_{YO}$  и  $V_{ZO}$  – составляющие вектора скорости электрона;  $t$  – время движения электрона.

Возводя в квадрат левую и правую части уравнений (1) и (2) и суммируя их, получим уравнения движения электрона в виде

$$\left(X - \frac{m}{eB} V_{YO}\right)^2 + \left(Y + \frac{m}{eB} V_{XO}\right)^2 = R^2, \quad (4)$$

где  $R = m\sqrt{V_{XO}^2 + V_{YO}^2}/eB$ . Следовательно, в ионизационной камере электрон движется равномерно по окружности, центр которой перемещается с постоянной скоростью  $V_{ZO}$  параллельно оси  $OZ$ , то есть параллельно направлению силовых линий магнитного поля. Поэтому траектория электрона представляет собой винтовую линию с постоянным шагом, лежащую на прямом круговом цилиндре, ось которого параллельна оси  $OZ$ . Проекцией траектории на плоскость  $XOY$  является окружность с радиусом

$$R = \frac{mV}{eB}, \quad (5)$$

где  $V = \sqrt{V_{XO}^2 + V_{YO}^2}$  – проекция скорости электрона на плоскость, перпендикулярную вектору  $\vec{B}$  (в данном случае на плоскость  $XOY$ ). Величина  $eB/m$  в уравнении (1) является угловой скоростью движения электрона по окружности. Поэтому время  $T$  одного оборота электрона по окружности или время одного витка винтовой линии определяется из условия

$$\frac{eB}{m} T = 2\pi, \quad (6)$$

то есть  $T = 2\pi m/eB$ . Путь, проходимый электроном в направлении силовых линий магнитного поля за время одного оборота (шаг спирали) будет

$$\Delta Z = L = V_{ZO} T = \frac{2\pi m V_{ZO}}{eB} = \frac{2\pi m V_O \sin \alpha}{eB}. \quad (7)$$

Для нахождения величины индукции магнитного поля, обеспечивающей прохождение электронного пучка без его уширения, воспользуемся соотношением (5), которое определяет зависимость радиуса окружности проекции траектории электрона на плоскость от величины индукции магнитного поля. Поскольку в нашем случае  $V_{XO} = 0$ , то  $V = \sqrt{V_{YO}^2} = V_{YO} = V_O \cos \alpha$ , и соотношение (5) принимает вид

$$B = \frac{mV_O \cos \alpha}{eR}. \quad (8)$$

Если  $U$  – разность потенциалов, которую прошёл электрон от катода до входа в ионизационную камеру, то

$$\frac{1}{2} mV_O^2 = eU, \quad (9)$$

или

$$V_0 = \sqrt{2eU/m}. \quad (10)$$

Тогда, подставляя в соотношение (8) значение скорости из (10), получаем

$$R = \sqrt{\frac{2mU}{eB^2}} \cos \alpha \quad (11)$$

или

$$B = \sqrt{\frac{2mU}{eR^2}} \cos \alpha. \quad (12)$$

Как видно из (11), радиус окружности  $R$  уменьшается с увеличением индукции магнитного поля  $B$ . Учитывая, что величина  $R$  не должна превышать половину ширины входной щели камеры ионизации, а  $\cos \alpha = 0,45$  (исходя из выбранной геометрии ионизатора), получаем следующую формулу для определения величины магнитной индукции в области ионизационной камеры

$$B = 0,45 \sqrt{\frac{2mU}{e \cdot 0,25 \cdot 10^{-6}}}. \quad (14)$$

Из соотношения (14), как показывают вычисления, следует, что диаметр электронного пучка, имеющего энергию 70 эВ, не будет превышать ширину входной щели ионизационной камеры в том случае, если величина индукции магнитного поля в области этой камеры будет не меньше 0,0253 Тл. Полученное значение магнитной индукции позволяет выбрать рациональную конструкцию электромагнита для фокусировки электронного пучка в источнике ионов современных масс-спектрометров с ионизацией электронным ударом [5, 6]. Если же магнитное поле в источнике ионов создают постоянными магнитами и энергию ионизирующих электронов в процессе работы масс-спектрометра изменяют, то необходимо учитывать возможное изменение чувствительности прибора, обусловленное нарушением условий фокусировки электронного пучка.

#### CALCULATION OF THE SYSTEM FOCUSING ELECTRON BEAM IN THE ION SOURCE OF MASS SPECTROMETER WITH ELECTRON IMPACT IONIZATION

*O.S. Kuzema*<sup>1</sup>, *P.O. Kuzema*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sumy National Agrarian University,  
160, Kirov Str., 40021, Sumy, Ukraine  
E-mail: [admin@sau.sumy.ua](mailto:admin@sau.sumy.ua)

<sup>2</sup> Chuiko institute of surface chemistry of NAS of Ukraine,  
17, General Naumov Str., 03164, Kyiv, Ukraine

*It has been found the correlations for the parameters of electron movement and it has been determined the value for magnetic induction in the region of ionization chamber providing the electron beam passage through the space of ionization chamber without its broadening.*

**Keywords:** MASS SPECTROMETER, ION SOURCE, IONIZATION CHAMBER, MAGNETIC FIELD, ELECTRON BEAM.

**РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ФОКУСУВАННЯ ЕЛЕКТРОННОГО ПУЧКА  
В ІОННОМУ ДЖЕРЕЛІ МАСС-СПЕКТРОМЕТРА З ІОНІЗАЦІЄЮ  
ЕЛЕКТРОННИМ УДАРОМ**

**О.С. Кузема<sup>1</sup>, П.О. Кузема<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Сумський національний аграрний університет,  
вул. Кірова, 160, 40021, Суми, Україна  
E-mail: [admin@sau.sumy.ua](mailto:admin@sau.sumy.ua)

<sup>2</sup> Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка НАН України,  
вул. Генерала Наумова, 17, 03164, Київ, Україна

*Одержано співвідношення для параметрів траєкторії електрона і визначено величину індукції магнітного поля в області іонізаційної камери, при якій забезпечується проходження електронного пучка через простір іонізації без його розширення.*

**Ключові слова:** МАС-СПЕКТРОМЕТР, ДЖЕРЕЛО ІОНІВ, ІОНІЗАЦІЙНА КАМЕРА, МАГНІТНЕ ПОЛЕ, ЕЛЕКТРОННИЙ ПУЧОК.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Г.Н. Зинченко, Н.С. Зинченко, *УФЖ* **16**, 1057 (1971).
2. В.К. Олейник, Ю.С. Рутгайзер, А.М. Шерешевский, *Приборы и техника эксперимента*, **1**, 141 (1965).
3. А.А. Сысоев, М.С. Чупахин, *Введение в масс-спектрометрию* (М.: Атомиздат: 1977).
4. А.С. Кузема, О.Р. Савин, И.Я. Чертков, *Анализирующие системы магнитных масс-спектрометров* (Київ: Наук. думка: 1987).
5. А.Т. Лебедев, *Масс-спектрометрия в органической химии* (М.: БИНОМ: 2003).
6. E. De Hoffmann, V. Stroobant, *Mass spectrometry: principles and applications* (Chichester: John Wiley & Sons Ltd: 2007).