

УДК 621.384.8

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ В ИСТОЧНИКЕ ИОНОВ С ЭЛЕКТРОННЫМ УДАРОМ****НУРИЕВ К.З.***ОКБ КП АНАКА НАН Азербайджанской Республики*

В работе приведены результаты исследования вероятности образования одно- и двухзарядных ионов молекул азота и кислорода при электронном ударе. В частности, обнаружено, что зависимость токов ионов от избыточной энергии электронов (свыше энергии ионизации) носит линейный и квадратичный характер для одно- и двухзарядных ионов соответственно.

В последнее время опубликован ряд экспериментальных работ, посвященных исследованию зарядового состава ионов и физическим процессам, определяющим вероятность образования многозарядных ионов [1–3]. Необходимость подобных исследований обусловлена повышением требований к точности масс-спектрометрических результатов, связанной с наложением токов ионов различных масс, но с одинаковыми  $M/q$ . Поэтому, одним из основных требований, предъявляемых к ионным источникам, это не только высокая эффективность ионизации, но и высокое относительное содержание однозарядных ионов для всех элементов.

Требование высокого относительного содержания однозарядных ионов является одним из важнейших из-за наличия в пакете ионов с отношениями  $2M_i/2e$ ,  $3M_i/3e$ , которые, накладываясь на основной пик в спектре ( $M_i/e$ ), приводят к неточностям в определении состава вещества. В таблице [4] приведены данные с возможными «загрязнениями», вызванными многозарядными и многоатомными ионами, массы которых незначительно отличаются от однозарядных ионов, а также требуемые для их разделения значения разрешающих способностей масс-спектрометра  $M/\Delta M$ .

Еще в первых работах по масс-спектрометрии с электронным ударом было показано, что вероятность образования однозарядных ионов при энергии электронов, близкой к потенциалу ионизации, зависит не только от моноэнергетичности электронного пучка, но и от избытка электронов над пороговой.

В настоящей работе сделана попытка исследовать зарядовый состав ионов и оценить вероятность образования одно- двух и более кратно заряженных ионов  $N_2$  и  $O_2$  методом ударной ионизации.

Эксперименты проводились на установке, схематически изображенной на рис. 1. Электронный пучок (1), сформировавшийся в электронной пушке (ЭП), проходя через систему одновременно действующих электрического и магнитного полей (2), попадал в ионизационную камеру (3). Исследуемый газ вводился в камеру ионизации через специальный напускатель (4), позволяющий регулировать скорость напуска.

Ионы из области ионизации (5) вытягивались с помощью вытягивающего (5) и вытягивающего (6) электродов и после ускорения и фокусировки направлялись к детектору (7) через ионно-оптическую систему (8) и дрейфовое пространство масс-анализатора ионов (9). Перед детектором была установлена металлическая диафрагма с отверстием  $d = 2$  мм.

			Таблица	
Массовое число	Ион	Точная масса	$M/\Delta M$	
17	$^{13}\text{C}^+\text{H}_4^+$	17,0312		1100
	$^{34}\text{S}^{++}$	16,999		900
	$^{17}\text{O}^+$	16,983		900
	$^1\text{H}^6\text{O}^+$	17,002		600
	$^1\text{N}^+\text{H}_3$	17,026		
28	$^{56}\text{Fe}^{++}$	27,976		1000
	$^{12}\text{C}^{16}\text{O}^+$	27,994		2500
	$^{14}\text{N}_2^+$	28,006		1100
	$^{12}\text{C}_2\text{H}_4$	28,031		
35	$^{70}\text{Ge}^{++}$	34,962		560
	$^{105}\text{Pd}^{+++}$	34,96827		60000
	$^{35}\text{Cl}^+$	34,96885		

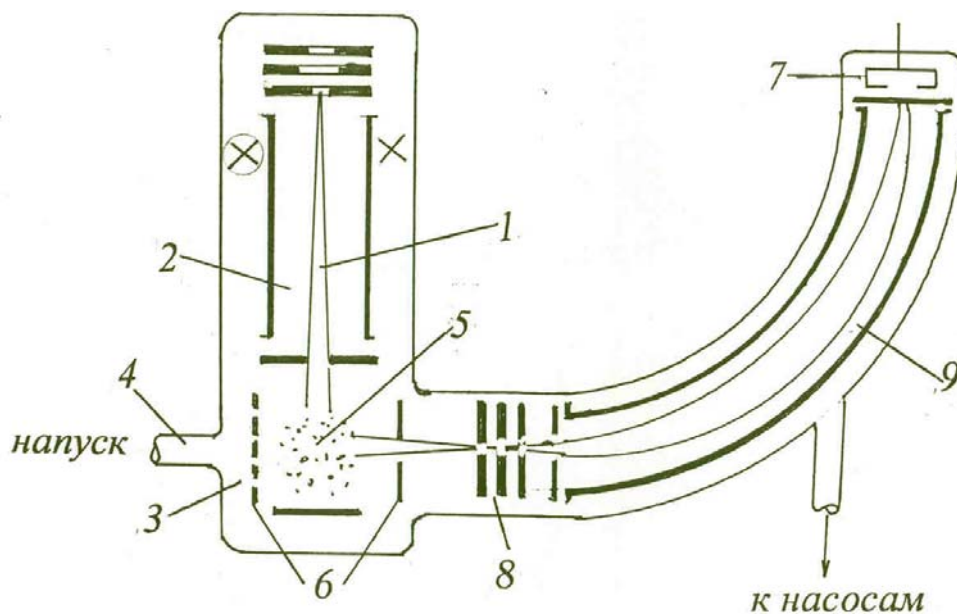


Рис. 1.

Высокий вакуум  $10^{-5}$  Па в области анализатора ионов обеспечивался с помощью форвакуумного и высоковакуумного насосов. Скорость напуска регулировалась с помощью вентилей от  $10^{-3}$  лПа/с до  $10^{-2}$  лПа/с при поддержке давления внутри ионизационной камеры  $p=10^{-3}$  Па. Электронная пушка, обладающая расчетным первенсом  $P=3 \cdot 10^{-6} A/B^{3/2}$ , обеспечивала токопрохождение электронов не более 50 %, что позволяло реализовать значение тока до  $5 \cdot 10^{-3}$  А при ускоряющем потенциале 50 – 60 В.

Разделение ионов по  $M_i/q$  производилось во времяпролетном масс-спектрометре с аксиально – симметричным электрическим полем. Детектором служил ВЭУ – 7 с коэффициентом усиления  $10^7$ .

Для получения моноэнергетического электронного пучка он пропускаться через систему со скрещенными электрическим и магнитным полями, которая «выделяла» электроны с узкой полосой энергий из функции распределения электронов по энергиям. Проходя через эту систему, в отверстие диафрагмы перед ионизационной камерой попадали те электроны, скорость которых удовлетворяла условию  $v = \frac{E}{B}$  (где  $E$  - напряженность электрического,  $B$  - индукция магнитного поля). Изменяя напряженность электрического поля (при  $B = const$ ) можно было получить пучок электронов с энергией 50 – 100 эВ в очень узком интервале энергии ( $\Delta W \approx 1,0$  эВ).

Для измерения эффективности ионизации атомов (молекул) между выталкивающими и вытягивающими электродами подавалось импульсное напряжение 500 В с длительностью  $10^{-7}$  с.

Результаты изменения тока ионов  $N_2^+$ ,  $N_2^{++}$ ,  $O_2^+$  и  $O_2^{++}$  в зависимости от энергии электронов вблизи энергии ионизации (14,54 эВ) приведены на рис. 2. Как видно из рисунка, ток ионов  $N_2^+$  увеличивается почти линейно с увеличением энергии электронов, при этом, чем больше  $J_e$ , тем больше угол наклона кривой  $J_N^+ = f(W_e/W_i)$ . Почти квадратичная зависимость тока двухзарядных ионов азота от  $We$  вблизи энергии двойной ионизации (29,695 эВ) вызвала некоторое сомнение в чистоте экспериментов. Поэтому было проведено достаточно большое количество экспериментов для различных атомов и молекул, которые подтвердили правильность результатов. Более того, исследование токов трехзарядных молекул азота и кислорода показало еще более сильную зависимость  $J_i^{+++} = f(We)$  вблизи порога энергии трехкратной ионизации.

Появление двух и более зарядных ионов примесей твердого тела наблюдалось и в спектре при лазерном облучении локальной поверхности образцов [2, 3]. В этих работах показано, что тангенс угла наклона  $lg J_i^{++} = f(lg We)$  к оси абсцисс, характеризующий скорость нарастания ионного тока данного заряда связана со временем ионизации элемента, которая в свою очередь пропорциональна квадрату второго потенциала ионизации данного элемента. Действительно, согласно формуле Ситона [5], описывающей отношение времени ионизации электронным ударом элемента  $x$  и  $y$  до заряда  $z$

$$\frac{\tau_i^x(z)}{\tau_i^y(z)} = \left( \frac{\varphi_x(z)}{\varphi_y(z)} \right)^2 \exp \left( \frac{\varphi_x(z) - \varphi_y(z)}{T_c} \right),$$

где  $T_c$  - температура электронов пучка. С другой стороны, выход ионов с  $z = +1, +2$ , и  $+3$  определяется временами ионизации элемента [3]. Иными словами, с увеличением времени ионизации атомов выход ионов всех зарядов уменьшается.

Примерно такой ход зависимости выхода ионов с различными  $z$  наблюдается и в наших экспериментах (см. рис. 2). Как видно из рисунка, при одинаковом относительном изменении энергии электронов вблизи энергии ионизации отношение выходов  $J_{N_2^+} / J_{N_2^{++}}$  составляет примерно 15 и 50 раз соответственно. Такая же зависимость наблюдается для молекул  $O_2$  (Рис.3). Тоже относится и к  $J_{N_2^+} / J_{N_2^{+++}}$

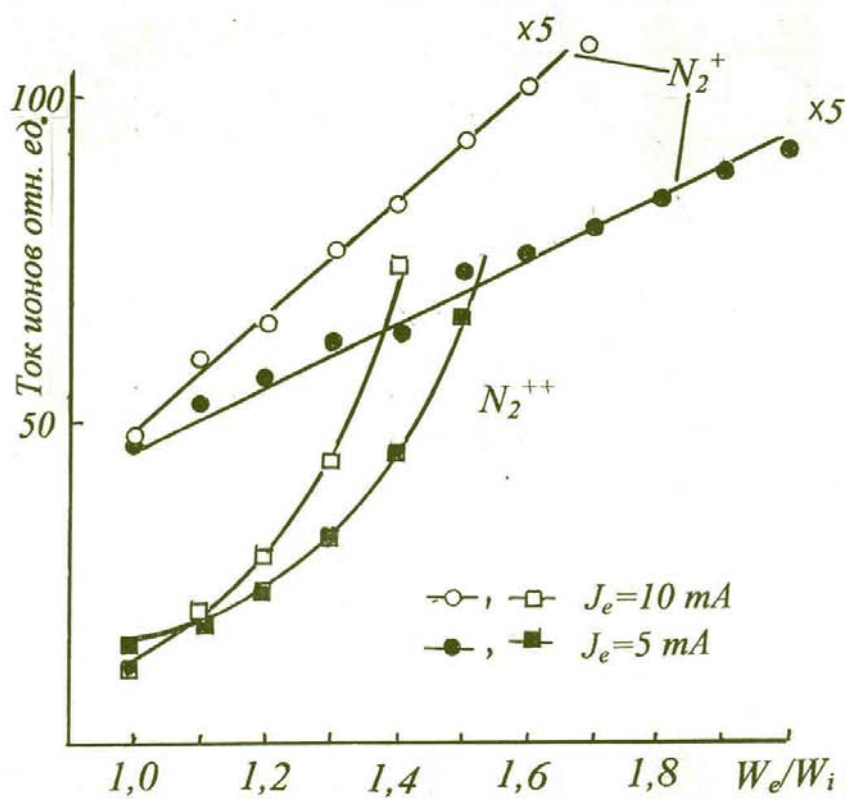


Рис. 2.

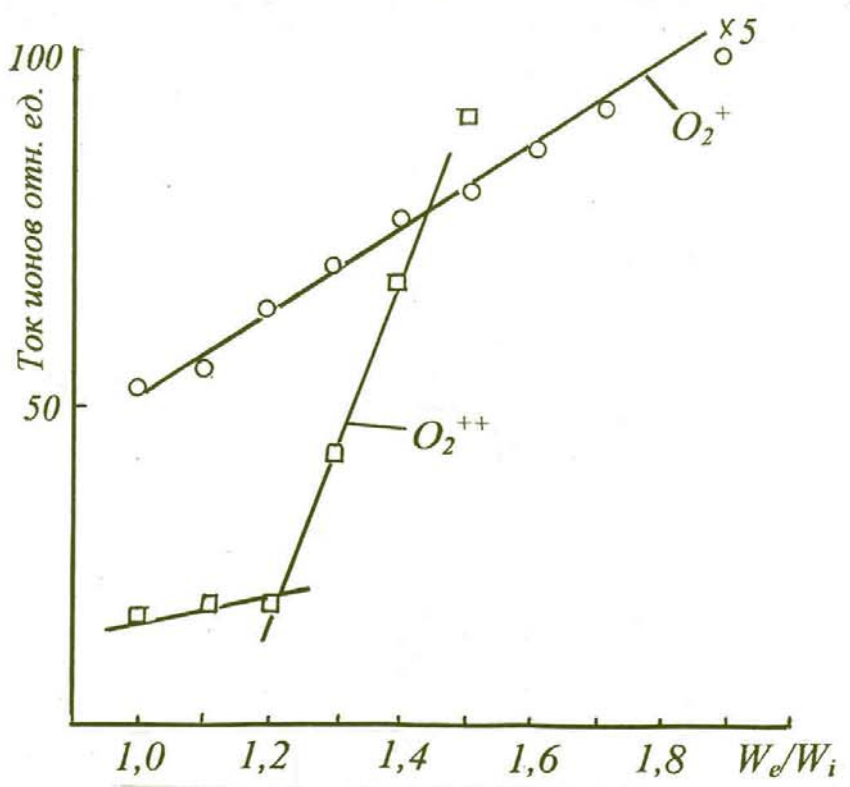


Рис. 3.

Таким образом, чем больше время ионизации атома данного элемента до иона с заданным зарядом, тем меньше будет зарегистрированное число ионов этого элемента зарядом  $z$ .

В заключении отметим, что вероятность образования одно- и многозарядных ионов определяется также и их сечением ионизации. Так, например, отношение сечений образования трехзарядных и однозарядных ионов азота  $N^{+++}/N^+$  и кислорода  $O^{+++}/O^+$  составляет 0,007 и 0,011 соответственно. У обоих этих атомов на внешней оболочке количество электронов 5 и 6 соответственно. Однако, отношение сечений образования ионов  $O^{+++}$  и  $O^+$  почти 1,5 раз больше, чем аналогичное отношение для атома азота. Эти факты указывают на то, что, по-видимому, вероятность образования многозарядных ионов определяется не только полным числом электронов в атоме, но и числом электронов на внешней оболочке.

Одновременно линейность начального участка кривых  $J_i = f(We)$  для  $N_2$  и  $O_2$ , представленных на рис. 2, равно как и других, не представленных в настоящей работе, указывают, на наш взгляд, на то, что в многократной ионизации атомов не последнюю роль могут играть безизлучательные Оже – переходы электронов из верхних уровней на нижние вакантные энергетические уровни с возбуждением валентных электронов.

1. Гашимов А.М., Табатабаеи Н.М., Нурубейли З.К., Нурубейли Т.К. //Электронная обработка материалов 2002, № 6, с. 62-69.
2. Бедиков М.Р., Сатыбалдыев Т.Б., Цой Т.Г. //Журн. Аналит. Химии, 1991, т. 46. в.9, с. 1742.
3. Оксенойд К.Г., Рамендик Г.И., Сильнов С.М., Сотниченко Е.А. //Журн. Аналит. Химии, 1990, т. 45, с. 858.
4. Чупахин М.С., Крючкова О.М., Рамендик Г.И. Аналитические возможности искровой масс – спектрометрии. М. Атомиздат, 1972, 224 с.
5. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных газодинамических явлений. М., Наука, 1966, 686 с.

## **ELEKTRON ZƏRBƏLİ İON MƏNBƏYİNDƏ ÇOXYÜKLÜ İONLARIN YARANMA EHTİMALININ TƏDQIQI**

**NURİYEV K.Z.**

İşdə elektron zərbəsi nəticəsində azot və oksigen molekullarının birqat və ikiqat ionlarının yaranma ehtimalının tədqiqininin təcrübi nəticələri verilmişdir. Məlum olmuşdur ki, birqat və ikiqat ionları cərəyanın elektroifrat əlavə (ionlaşma enerjisindən artıq) enerjisindən asılılığı uyğun olaraq xətti və kvadratik xarakter daşıyır.

## **INVESTIGATION OF PROBABILITY OF MULTICHARGED IONS FORMATION IN THE IONS SOURCE WITH ELECTRONIC IMPACT**

**NURIYEV K.Z.**

Results of experimental research of possibility of forming of single – double and triple charge ions of nitrogen and oxygen upon impact of electrons are given in the article. Particularly, it is found, that dependence of ions' current from redundant energy of electrons (more than energy of ionization) has a linear and square character for single and double charged ions accordingly.