

В. И. Возный\*, Д. П. Шульга, А. А. Дрозденко, М. И. Захарец, Е. А. Миронец, А. С. Бриченко

Институт прикладной физики НАН Украины, Сумы, Украина

\*Ответственный автор: [vozny56@gmail.com](mailto:vozny56@gmail.com)

## ИОННЫЙ ИСТОЧНИК ДВУКРАТНО ЗАРЯЖЕННЫХ ИОНОВ ГЕЛИЯ НА ОСНОВЕ ПЕННИНГОВСКОГО РАЗРЯДА

Представлены результаты исследования разработанного в Институте прикладной физики НАН Украины ионного источника пеннинговского типа для получения ионов  $He^{2+}$  с целью повышения энергии ускоренных ионов до 3,2 МэВ. Такая энергия необходима для реализации метода ядер отдачи при определении концентрации водорода в конструкционных материалах ядерной энергетики. Параметры ионного источника: напряжение разряда 6 кВ, ток разряда  $(0,8 \div 1,2)$  мА, ток однозарядных ионов гелия  $He^+$  до 24 мкА, ток двукратно заряженных ионов гелия  $He^{2+}$  до 0,5 мкА.

*Ключевые слова:* ионный источник, пеннинговский разряд, электростатический ускоритель, масс-спектрометр, ERDA, RBS.

### Введение

В Институте прикладной физики (ИПФ) НАН Украины создан аналитический комплекс на базе электростатического ускорителя (ЭСУ) Ван-де-Грааффа с энергией ионов до 2 МэВ [1 - 3]. В составе комплекса работают пять аналитических каналов: ионной люминесценции, ядерных реакций, сканирующего ядерного микрозонда, резерфордовского обратного рассеяния и ядер отдачи (ERDA – elastic recoil detection analysis). Канал ERDA предназначен для неразрушающего количественного определения концентрации водорода в материалах методом ядер отдачи [4]. Для реализации метода ERDA требуются пучки ионов гелия с энергией порядка 3 МэВ. Поскольку ускоряющее напряжение ЭСУ не превышает 2 МВ, возникла необходимость в разработке ионного источника двукратно заряженных ионов гелия. При работе ускорителя с напряжением на кондукторе 1,6 МВ энергия пучка ионов  $He^{2+}$  будет равна 3,2 МэВ.

Среди существующих источников многозарядных ионов источники пеннинговского типа занимают особое место вследствие своих достоинств: компактности размеров, низкой стоимости, простоты конструкции, малого расхода газа, достаточного срока службы и надежности работы [5 - 9].

В статье представлены результаты исследования ионного источника с пеннинговским разрядом. Источник предназначен для получения пучка двукратно заряженных ионов гелия при реализации метода ERDA при проведении измерений концентрации водорода в конструкционных материалах ядерной энергетики.

### Конструкция источника

Схема ионного источника представлена на рис. 1. Цилиндрический анод 2, внутри которого расположены катод 5 с отверстием для экстракции пучка и антикатод 1, образуют ячейку Пеннинга с холодным катодом. Цилиндрический анод изготовлен из нержавеющей стали, катод с диаметром отверстия эмиссии 0,8 мм и антикатод – из молибдена. Диаметр анода 25 мм, расстояние между катодом и антикатодом 43 мм. Таким образом, отношение длины разряда к его диаметру равно 1,7 и близко к оптимальному значению 2 [5].

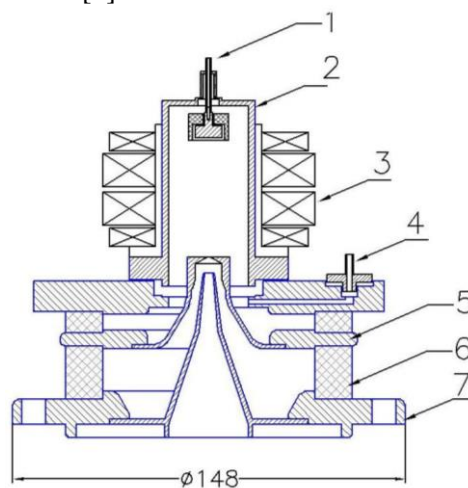


Рис. 1. Схема ионного источника с пеннинговским разрядом: 1 – антикатод; 2 – анод; 3 – магнитная система; 4 – напуск газа; 5 – катод, 6 – изоляторы, 7 – фокусирующий электрод.

Коаксиально аноду расположена магнитная система 3, состоящая из 4-х кольцевых ферритовых магнитов. Размеры магнитной сборки: внут-

© В. И. Возный, Д. П. Шульга, А. А. Дрозденко, М. И. Захарец, Е. А. Миронец, А. С. Бриченко, 2017

ренный диаметр кольцевых магнитов 42 мм, внешний – 70 мм. Измерение магнитного поля выполнялось с помощью магнитометра FH54 “Magnet-Physik”. Величина продольной составляющей магнитной индукции  $B_z$  на оси разряда равна 0,085 - 0,09 Тл.

Поскольку источник предназначен для установки на ЭСУ, размеры нижнего фланца определяются геометрией ускорительной трубки, к которой крепится источник. На нижнем фланце расположен фокусирующий электрод 7, форма и размеры которого рассчитаны для согласования ионно-оптических систем ионного источника и ускоряющей трубки ЭСУ.

### Экспериментальные результаты

Измерение характеристик ионного источника с пеннинговским разрядом проводилось на экспериментальном стенде, схема которого показана на рис. 2. Источник присоединялся к измерительной вакуумной камере, давление в которой на уровне  $\sim 1 \cdot 10^{-4}$  Па обеспечивалось турбомолекулярным насосом «Leybold-360» (скорость откачки 360 л/с). На расстоянии 100 мм от источника находится подвижный цилиндр Фарадея для измерения ионного тока  $I_i$  пучка.

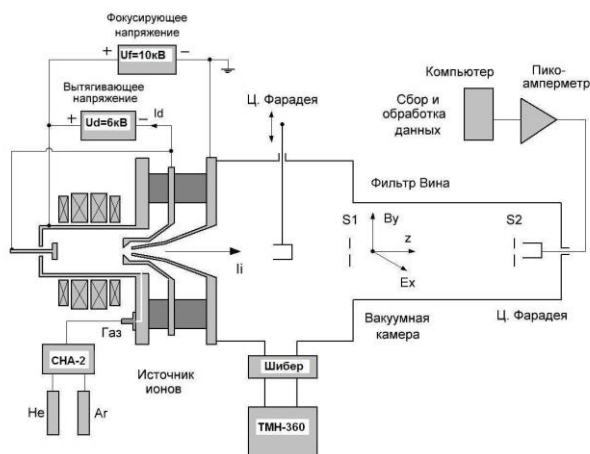


Рис. 2. Схема экспериментального стенда для измерения параметров ионного источника.

Для работы источника достаточно подать между анодом и катодом разрядное напряжение  $U_d = 6$  кВ с током разряда порядка  $I_d = (0,5 \div 1,2)$  мА. Это же напряжение является вытягивающим и служит для экстракции ионного пучка. Фокусирующее напряжение могло изменяться в пределах  $U_f = (0 \div 10)$  кВ для фокусировки пучка либо на цилиндр Фарадея, либо на цилиндр Фарадея фильтра Вина.

Фильтр Вина (ЕхВ сепаратор) применялся для определения массового состава пучка. В данном масс-сепараторе однородное постоянное магнит-

ное поле  $B_y$  создается катушками электромагнита с расстоянием между полюсами 8 мм. Постоянное электрическое поле  $E_x$  создается разностью потенциалов между двумя пластинами конденсатора. Расстояние между пластинами 3 мм, длина пластин 100 мм. Размеры входной S1 и анализирующей S2 щелей по x-координате равны 1 и 0,4 мм соответственно. Расстояние между щелями 400 мм.

Напуск рабочего газа (гелий, аргон) в источник производится с помощью системы напуска газа СНА-2. Калибровка системы напуска проводилась путем постановки термодатчика ПМТ-2 на ионный источник вместо разрядной камеры. Результаты измерения давления гелия  $p$  (Па) в зависимости от величины напуска газа  $Q$  (отн. ед.) хорошо аппроксимируются экспоненциальной функцией  $p = 2,218 + 3,677 \cdot 10^{-13} \times \exp(Q/33,585)$ . Таким образом, в рабочем диапазоне напуска газа  $Q = (840 \div 960)$  отн. ед. давление гелия в разрядной камере источника изменяется в пределах  $(2 \div 3)$  Па. Расход газа при работе источника не измерялся, но по оценкам он равен  $(0,6 \div 0,9) \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$  или  $(2 \div 3) \text{ см}^3 \cdot \text{атм/ч}$ , что является приемлемой величиной для потока газа в ускорительную трубку ЭСУ [6].

### Вольт-амперные характеристики ионного источника

На рис. 3 показан график изменения разрядного тока  $I_d$  от напуска газа  $Q$ . Рабочий газ - гелий. Измерения проводились как при увеличении напуска газа  $Q$  (точки), так и при его уменьшении (треугольники).

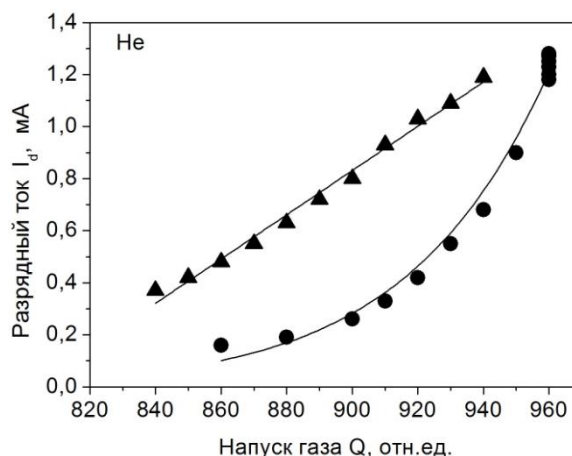


Рис. 3. Зависимость разрядного тока  $I_d$  от напуска газа  $Q$ . Точки - увеличение  $Q$ , треугольники - уменьшение  $Q$ .  $U_d = 6$  кВ.

Различное поведение разрядного тока можно объяснить тем, что при повышении напуска газа (точки), начиная с малых значений  $Q$ , катоды

источника еще недостаточно разогреты и разряд находится в стадии установления. В установившемся режиме при уменьшении напуска газа (треугольники) температура катодов уменьшается медленно и разрядный ток линейно зависит от напуска газа. В установившемся режиме при напуске газа  $Q = 900$  отн. ед. разрядный ток равен  $I_d = 0,8$  мА (треугольники), в то время как в начале работы (точки) при том же напуске газа разрядный ток равен  $0,2$  мА.

Ток  $I_i$  ионного пучка, извлекаемого из источника, измерялся с помощью цилиндра Фарадея. На рис. 4 показан график зависимости ионного тока  $I_i$  от напуска газа  $Q$ , измеренный как при увеличении напуска газа (точки), так и при его уменьшении (треугольники).

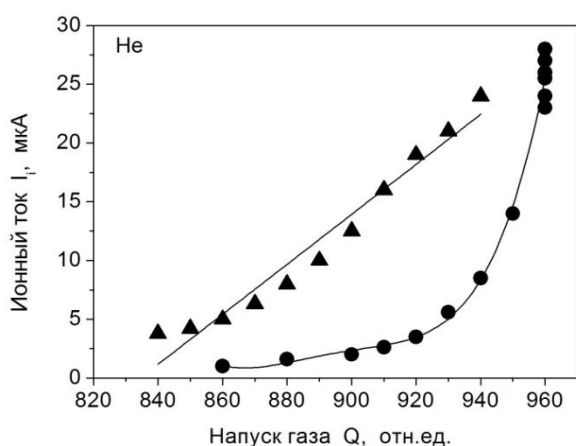


Рис. 4. Зависимость ионного тока пучка  $I_i$  от напуска газа  $Q$ .  $U_d = 6$  кВ.

Видно, что характер зависимости ионного тока  $I_i$  от напуска газа  $Q$  подобен характеру зависимости разрядного тока  $I_d$  от  $Q$  (см. рис. 3).

На основании этих двух графиков была построена зависимость ионного тока  $I_i$  от тока разряда  $I_d$ , (рис. 5) при увеличении (точки) и при уменьшении (треугольники) напуска газа  $Q$ .

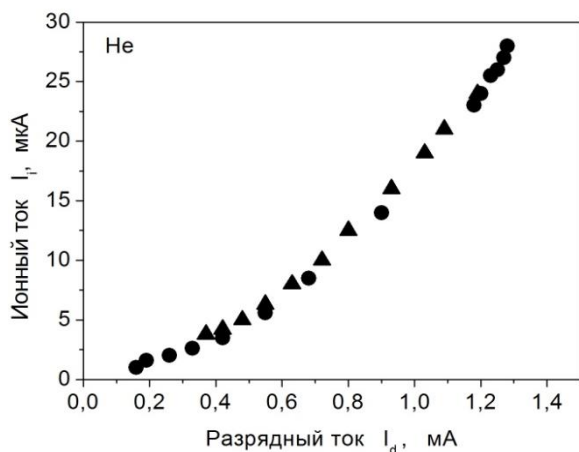


Рис. 5. Зависимость ионного тока пучка  $I_i$  от тока разряда  $I_d$ .  $U_d = 6$  кВ.

Видно, что обе кривые почти совпадают (с точностью 4 %). Это указывает на то, что определяющим параметром работы источника является именно разрядный ток. При увеличении разрядного тока до  $I_d = 1,2$  мА ионный ток достигает величины  $I_i = 24$  мкА. При среднем значении разрядного тока  $I_d = 0,72$  мА ток ионного пучка равен  $I_i = 10$  мкА.

На рис. 6 показана зависимость разрядного тока  $I_d$  от величины разрядного напряжения  $U_d$  при различном напуске газа  $Q$ . При увеличении разрядного напряжения от  $5,0$  до  $7,0$  кВ разрядный ток  $I_d$  линейно возрастает с увеличением напряжением  $U_d$ .

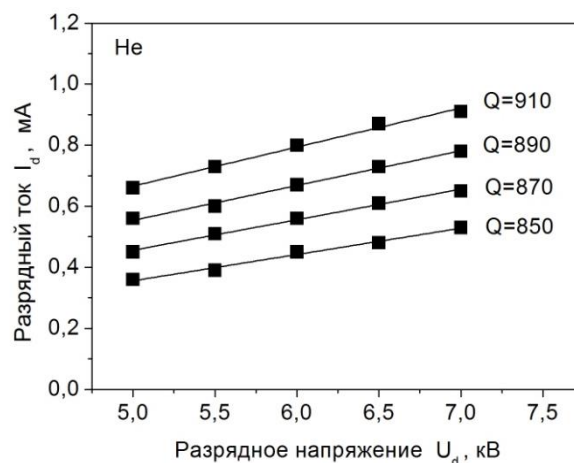


Рис. 6. Зависимость разрядного тока  $I_d$  от разрядного напряжения  $U_d$  при различном напуске газа  $Q$ .

### Массовый спектр ионного пучка

Для определения сорта ионов, генерируемых источником, был проведен массовый анализ состава ионного пучка с помощью фильтра Вина (см. рис. 2). Ионный пучок, двигаясь вдоль оси  $z$ , попадает в область, ограниченную полюсами электромагнита и электростатическими пластинами, причем силовые линии электрического  $E_x$  и магнитного  $B_y$  полей взаимно перпендикулярны. Уравнения движения иона массой  $M$  и зарядом  $q$  в скрещенных постоянных электрическом  $E_x = E$  и магнитном  $B_y = B$  полях имеют вид:

$$M \left( \frac{dv_x}{dt} \right) = qE_x - qv_z B_y, \quad M \left( \frac{dv_y}{dt} \right) = 0,$$

$$M \left( \frac{dv_z}{dt} \right) = qv_x B_y.$$

Условие прямолинейного прохождения ионов через фильтр выглядит как  $E = v_0 B$ . Поскольку скорость иона, ускоренного до потенциала  $V$ , равна  $v_0 = (2qV/M)^{1/2}$ , то ионы пройдут через фильтр, если  $(2qV/M)^{1/2} = E/B$ . Заряд и масса иона равны соответственно  $q = z \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл и  $M = m \cdot 1,67 \cdot 10^{-27}$  кг, где  $m$  - массовое число,

равное числу протонов и нейтронов в ядре иона, а  $z$  - зарядовое состояние иона. Тогда из последнего уравнения получаем выражение для массового отношения:  $m/z = (1,9 \cdot 10^8 V B^2) / E^2$ .

Развертка масс-спектра осуществлялась путем сканирования магнитного поля, изменяя линейно со временем ток электромагнита. Измеренная с помощью магнитометра FH54 "Magnet-Physik" зависимость магнитной индукции  $B$  между полюсами электромагнита от тока  $I$  в катушке записывается как  $B = 0,02 + 0,27 \cdot I$ , где  $B$  выражается в теслах, а  $I$  - в амперах. Поскольку  $E = U/d$ , где  $U = 138$  В - напряжение между электростатическими пластинами,  $d = 3$  мм - расстояние между ними, то выражение для массового отношения записывается как  $m/z = 0,09 V(0,02 + 0,27 \cdot I)^2$ .

Сложность определения величины тока ионов  $\text{He}^{2+}$  масс-спектрометрическим методом состоит в том, что отношение  $m/z$  для двукратно заряженных ионов гелия равно 2, и такое же отношение имеют однократно ионизованные ионы молекулярного водорода  $\text{H}_2^+$ . Молекулярный водород присутствует в разряде источника, во-первых, из-за того, что при малом выходном отверстии в катод невозможно тщательно откачать ионный источник до высокого вакуума. В разрядной камере источника обязательно присутствует остаточная атмосфера с парами воды и парами вакуумного масла, которые осаждаются в виде углеводородной пленки на электродах. Во-вторых, как отмечается в работе [10], основным остаточным газом является водород и газы с массой 28 а.е.м. - в основном CO. Эти газы образуются, по-видимому, в самом ионном источнике. Водород и углерод, являющиеся примесями всех металлов, диффундируют наружу. Окись углерода покрывает поверхности и медленно десорбирует при комнатной температуре [10].

Таким образом, в массовом спектре пик ионов гелия  $\text{He}^{2+}$  совпадает с пиком ионов молекулярного водорода  $\text{H}_2^+$ . Разделение этих двух пиков возможно при работе со спектрометром с очень высоким разрешением по массам ( $m/\Delta m = 2000$ ). Разделение пиков будет происходить из-за разницы масс протона и нейтрона. Таким разрешением обладают дорогостоящие масс-спектрометры, например времяпролетные. Применяемый в данной работе фильтр Вина обладает разрешением порядка  $m/\Delta m \sim 100$  и используется для измерения массового состава ионного пучка и определения тока  $I_\Sigma$  суммарного пика ионов  $\text{He}^{2+}$  и  $\text{H}_2^+$ .

Массовый спектр ионного пучка при работе источника на гелии показан на рис. 7. На графике

по горизонтальной оси отложена величина, пропорциональная  $(m/z)^{1/2}$ . Отношение массы ионов к заряду  $m/z$  указано рядом с соответствующим пиком. На спектре видны суммарный пик ионов  $\text{H}_2^+$  и  $\text{He}^{2+}$  ( $m/z = 2$ ), пик ионов гелия  $\text{He}^+$  ( $m/z = 4$ ), группа пиков с  $m/z = (12 \div 18)$  и пик ионов с  $m/z = 28$ . Высота суммарного пика ионов  $\text{H}_2^+$  и  $\text{He}^{2+}$  равна  $I_\Sigma = 1,4$  нА, высота пика ионов гелия  $\text{He}^+ - 3,6$  нА. Группа ионов с  $m/z = (12 \div 18)$ , показанная в увеличенном масштабе в выделенном квадрате, состоит из ионов  $\text{C}^+$ , фрагментарных ионов  $\text{CH}_2^+$ ,  $\text{CH}_3^+$ ,  $\text{CH}_4^+$ ,  $\text{CH}_5^+$  или  $\text{OH}^+$  и ионов воды  $\text{H}_2\text{O}^+$ . Пик с  $m/z = 28$  соответствует ионам  $\text{C}_2\text{H}_4^+$  или  $\text{CO}^+$ .

Применяемый при измерениях гелий со степенью очистки 99,99 % не может иметь такого количества примесей. Все эти ионы, за исключением ионов гелия  $\text{He}^+$ , образуются при ионизации паров органической пленки, которая возникает на электродах источника.

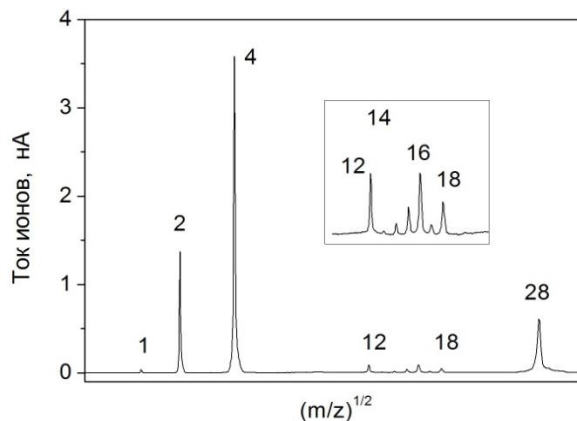


Рис. 7. Массовый спектр ионного пучка. Рабочий газ - гелий,  $U_d = 4,5$  кВ, ток разряда  $I_d = 0,46$  мА, ионный ток  $I_i = 8$  мкА. Отношение  $m/z$  указано рядом с соответствующим пиком.

Это подтверждает массовый спектр остаточного газа (рис. 8), который был измерен при работе ионного источника без подачи рабочего газа. На массовом спектре присутствуют те же пики ионов примесей, что и на спектре рис. 7. Это пик ионов молекулярного водорода  $\text{H}_2^+$  ( $m/z = 2$ ), группа пиков ионов с отношением  $m/z = (12 \div 18)$  ( $\text{C}^+$ ,  $\text{CH}_2^+$ ,  $\text{CH}_3^+$ ,  $\text{CH}_4^+$ ,  $\text{CH}_5^+$ ,  $\text{OH}^+$ ,  $\text{H}_2\text{O}^+$ ) и пик с  $m/z = 28$  ( $\text{C}_2\text{H}_4^+$ ,  $\text{CO}^+$ ).

Для того чтобы удалить органическую пленку и тем самым уменьшить образование ионов молекулярного водорода  $\text{H}_2^+$ , в источник подавался аргон и зажигался разряд. Тяжелые ионы аргона с массовым числом  $m = 40$ , бомбардирующие оба катода ионного источника, должны разрушить примесную пленку, образуемую на электродах источника.

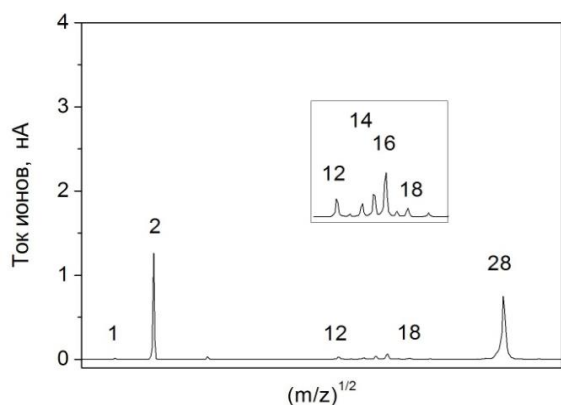


Рис. 8. Массовый спектр ионного пучка при работе источника на остаточном газе.

$U_d = 5$  кВ,  $I_d = 0,46$  мА,  $I_i = 2$  мкА.

При работе ионного источника на аргоне в течение 20 мин в спектре ионного пучка видны лишь 2 пика – пик двукратно заряженных ионов аргона  $Ar^{++}$  ( $m/z = 20$ ) и пик однократно заряженных ионов аргона  $Ar^+$  ( $m/z = 40$ ). Пики ионов водорода  $H_2^+$ , группа пиков ионов с  $m/z = (12 \div 18)$  и пик ионов с  $m/z = 28$  исчезли, что свидетельствует об удалении органической пленки в источнике.

После проведения очистки аргоновым разрядом в ионный источник снова подавался гелий. Массовый спектр пучка показан на рис. 9. На спектре видны лишь два пика – пик двукратно заряженных ионов гелия  $He^{2+}$  ( $m/z = 2$ ) и пик однократно заряженных ионов гелия  $He^+$  ( $m/z = 4$ ). На спектре отсутствуют пики ионов с  $m/z = (12 \div 18)$  и пик с  $m/z = 28$ , что свидетельствует об удалении органической пленки с внутренних поверхностей ионного источника. Высота суммарного пика уменьшилась в 3,3 раза и равна  $I_\Sigma = 0,4$  нА, в то время как до очистки аргоном высота этого пика равнялась  $I_\Sigma = 1,4$  нА (см. рис. 7). В данном пике значительно уменьшено паразитное влияние ионов водорода  $H_2^+$  и пик состоит в основном из двукратно заряженных ионов гелия  $He^{2+}$ . При высоте пика ионов гелия  $He^+$  4,4 нА отношение тока ионов  $He^{2+}$  к полному току составляет 8,6 %.

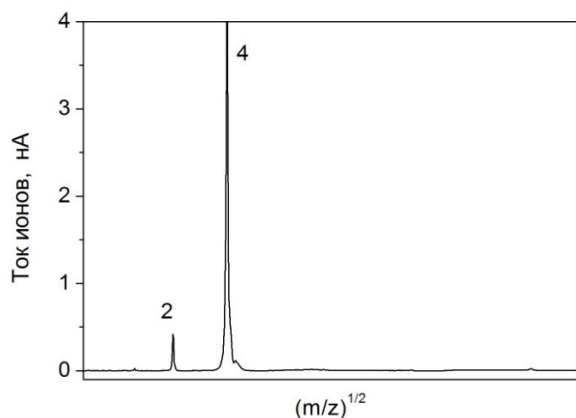


Рис. 9. Массовый спектр после очистки аргоном. Рабочий газ - гелий,  $U_d = 4,5$  кВ,  $I_d = 0,94$  мА,  $I_i = 16,5$  мкА.

Было выполнено измерение отношения суммарного тока ионов  $H_2^+$  и  $He^{2+}$   $I_\Sigma$  к полному току пучка  $I_i$  при изменении напуска газа  $Q$ . Измерения показали, что величина  $I_\Sigma/I_i$  меняется незначительно в широком диапазоне напуска газа  $Q$ , оставаясь в пределах  $\sim (6 \div 9)$  %.

### Определение величины тока ионов $He^{2+}$

Для определения величины тока двукратно заряженных ионов ионный источник был установлен на электростатический ускоритель Ван-де-Граафа аналитического комплекса ИПФ НАН Украины. При небольшом напуске гелия получен общий ионный ток на прямом пучке 4 мкА. После сепарации пучка анализирующим магнитом с поворотом на  $90^\circ$  ток однократно заряженных ионов гелия  $He^+$  равен 1,5 мкА, а суммарный ток пучка ионов  $H_2^+$  и  $He^{2+}$  равен  $(0,15 \div 0,18)$  мкА, что составляет  $\sim 10$  % от тока ионов  $He^+$ . Примерно такое же соотношение  $(6 \div 9)$  % установлено и при масс-спектрометрических измерениях.

Определение тока ионов  $He^{2+}$  в пучке [11, 12] производилось с помощью метода резерфордского обратного рассеяния (RBS). На рис. 10 представлены спектры RBS, полученные при рассеянии пучка ионов гелия  $He^+$  (точки) и пучка ионов  $H_2^+$  и  $He^{2+}$  (линия).

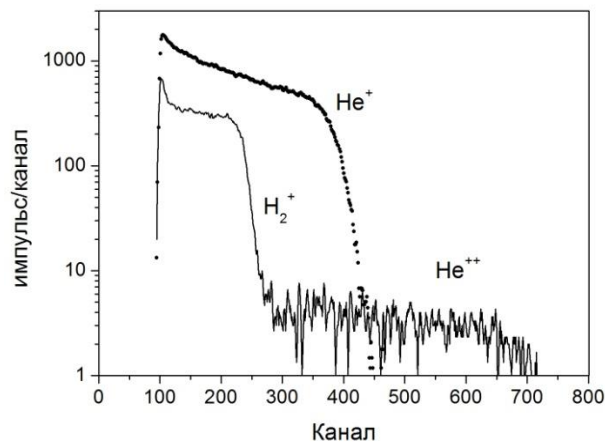


Рис. 10. Энергетический спектр ионов гелия  $He^+$  и ионов  $H_2^+$  и  $He^{2+}$ , обратно рассеянных от танталовой мишени.

Ускоряющее напряжение ЭСУ равнялось 1 МВ. При этом ионы  $He^{2+}$  приобретают энергию 2 МэВ, а каждое ядро водорода в ионе  $H_2^+$  получит энергию, близкую к 0,5 МэВ. В качестве мишени использовался тантал, детектор заряженных частиц находился под углом  $135^\circ$ .

Измерения показали, что в суммарном пучке ионов  $H_2^+$  и  $He^{2+}$  ток двукратно заряженных ионов  $He^{2+}$  составляет 40 %. При суммарном токе пучка ионов  $H_2^+$  и  $He^{2+}$ , равном  $I_\Sigma = (0,15 \div 0,18)$  мкА, на мишени получен ток

двукратно заряженных ионов гелия  $\text{He}^{2+} \sim (60\div 70)$  нА, что составляет 4 % от общего тока пучка.

Таким образом, на основании приведенных расчетов можно сделать вывод, что ионный источник при среднем значении общего тока пучка 12 мкА способен генерировать двукратно заряженные ионы гелия  $\text{He}^{2+}$  с током до 0,5 мкА.

### Заключение

Измерения концентрации водорода в конструкционных материалах ядерной энергетики методом ядерной отдачи, проводимые в ИПФ НАН Украины, требуют повышения энергии электростатического ускорителя Ван-де-Граафа до 3,2 МэВ. С этой целью разработан ионный источник на основе пеннинговского разряда, обеспечивающий пучок двукратно заряженных ионов

гелия  $\text{He}^{2+}$  и повышающий энергию ускоренных ионов до 3,2 МэВ при ускоряющем напряжении 1,6 МВ.

Измерение величины тока двукратно заряженных ионов гелия  $\text{He}^{2+}$  в ионном пучке проводилось на ускорительном комплексе ИПФ методом RBS. Измерения показали, что ток ионов  $\text{He}^{2+}$  составляет 4 % от общего тока пучка. При токе пучка 12 мкА ток двукратно заряженных ионов гелия  $\text{He}^{2+}$  может достигать величины 0,5 мкА. Учитывая потери пучка при его транспортировке по тракту ускорительного комплекса, на мишени получен ток пучка ионов гелия  $\text{He}^{2+} \sim (60\div 70)$  нА. Такая величина тока достаточна для реализации метода ERDA при проведении измерений концентрации водорода в конструкционных материалах ядерной энергетики.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. Storizhko et al. Microanalytical accelerator-based complex of IAP of NASU. Book of Abstracts of XVI Intern. Conf. on Electrostatic Accelerators and Beam Technologies (2006) p. 88.
2. V.E. Storizhko et al. The Sumy scanning nuclear microprobe: Design features and first tests. *Nuclear Instruments and Methods B* 260 (2007) 49.
3. O.M. Buhay et al. Current Status of the IAP NASU Accelerator-Based Analytical Facility. *Physics Procedia* 66 (2015) 166.
4. A.B. Kramchenkov et al. Elastic recoil detection channel for hydrogen investigation in materials. *Science and Innovation* 6(5) (2010) 32.
5. Huashun Zhang. *Ion Sources* (Science Press Beijing and Springer, 1999).
6. L.S. Glazunov et al. Multi-charged ions source. *Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki* 3 (2011) 68.
7. B.K. Das et al. Development of hollow anode penning ion source for laboratory application. *Nuclear Instruments and Methods A* 669 (2012) 19.
8. B.K. Das, A. Shyam. Development of compact size penning ion source for compact neutron generator. *Review of Scientific Instruments* 79 (2008) 123305.
9. J.L. Rovey, B.P. Ruzic, T.J. Houlahan. Simple Penning ion source for laboratory research and development applications. *Review of Scientific Instruments* 78 (2007) 106101.
10. W.T. Lange. Gauges for ultrahigh vacuum. *Physics Today* 25(8) (1972) 40.
11. S.G. Karpus et al.  ${}^4\text{He}^{2+}$  and  $\text{H}^+$  ion beam separation on "SOKOL" IBA facility. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Physics Investigations* 3(97) (2015) 95.
12. В.Н. Бондаренко и др. Получение пучков двухзарядных ионов  ${}^4\text{He}$  на малогабаритном электростатическом ускорителе «СОКОЛ». *Вестник БГУ. Серия 1: Физика, Математика, Информатика* 3 (2015) 58.

**В. І. Возний\*, Д. П. Шульга, О. О. Дрозденко, М. І. Захарець, Є. А. Міронець, О. С. Бриченко**

*Інститут прикладної фізики НАН України, Суми, Україна*

\*Відповідальний автор: [vozny56@gmail.com](mailto:vozny56@gmail.com)

### ІОННЕ ДЖЕРЕЛО ДВОРАЗОВО ЗАРЯДЖЕНИХ ІОНІВ ГЕЛІЮ НА ОСНОВІ ПЕННІНГОВСЬКОГО РОЗРЯДУ

Представлено результати дослідження іонного джерела на основі пеннінговського розряду, розробленого в ИПФ НАН України для отримання пучка дворазово заряджених іонів гелію  $\text{He}^{2+}$  і підвищення енергії прискорених іонів до 3,2 МеВ. Така енергія необхідна для роботи каналу ERDA при визначенні концентрації водню в конструкційних матеріалах ядерної енергетики. Параметри іонного джерела: напруга розряду 6 кВ, струм розряду 0,8 - 1,2 мА, струм однозарядних іонів гелію  $\text{He}^+$  до 24 мкА, струм дворазово заряджених іонів гелію  $\text{He}^{2+}$  до 0,5 мкА.

*Ключові слова:* джерело іонів, пеннінговський розряд, електростатичний прискорювач, мас-спектрометр, ERDA, RBS.

V. I. Voznyi\*, D. P. Shulha, O. O. Drozdenko, M. I. Zakharets, E. A. Mironets, O. S. Brichenko

*Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, Sumy, Ukraine*

\*Corresponding author: [vozny56@gmail.com](mailto:vozny56@gmail.com)

### ION SOURCE BASED ON PENNING DISCHARGE FOR PRODUCTION OF DOUBLY CHARGED HELIUM IONS

The article presents the results of operation of ion source with Penning discharge developed in the IAP of NAS of Ukraine to produce doubly charged helium ions  $\text{He}^{2+}$  beam and to increase the energy of accelerated ions up to 3.2 MeV. This energy is necessary for ERDA channel when measuring hydrogen concentration in the structural materials used in nuclear engineering. The ion source parameters are the following: discharge voltage is 6 kV, discharge current is 0.8 - 1.2 mA, the current of singly charged helium ions  $\text{He}^+$  24  $\mu\text{A}$ , the current of doubly charged helium ions  $\text{He}^{2+}$  0.5  $\mu\text{A}$ .

*Keywords:* ion source, Penning discharge, electrostatic accelerator, mass-spectrometer, ERDA, RBS.

#### REFERENCES

1. V. Storizhko et al. Microanalytical accelerator-based complex of IAP of NASU. Book of Abstracts of XVI Intern. Conf. on Electrostatic Accelerators and Beam Technologies (2006) p. 88.
2. V.E. Storizhko et al. The Sumy scanning nuclear microprobe: Design features and first tests. *Nuclear Instruments and Methods B* 260 (2007) 49.
3. O.M. Buhay et al. Current Status of the IAP NASU Accelerator-Based Analytical Facility. *Physics Procedia* 66 (2015) 166.
4. A.B. Kramchenkov et al. Elastic recoil detection channel for hydrogen investigation in materials. *Science and Innovation* 6(5) (2010) 32.
5. Huashun Zhang. *Ion Sources* (Science Press Beijing and Springer, 1999).
6. L.S. Glazunov et al. Multi-charged ions source. *Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki* 3 (2011) 68.
7. B.K. Das et al. Development of hollow anode penning ion source for laboratory application. *Nuclear Instruments and Methods A* 669 (2012) 19.
8. B.K. Das, A. Shyam. Development of compact size penning ion source for compact neutron generator. *Review of Scientific Instruments* 79 (2008) 123305.
9. J.L. Rovey, B.P. Ruzic, T.J. Houlahan. Simple Penning ion source for laboratory research and development applications. *Review of Scientific Instruments* 78 (2007) 106101.
10. W.T. Lange. Gauges for ultrahigh vacuum. *Physics Today* 25(8) (1972) 40.
11. S.G. Karpus et al.  $^4\text{He}^{2+}$  and  $\text{H}^{2+}$  ion beam separation on "SOKOL" IBA facility. *Problems of Atomic Science And Technology. Series: Nuclear Physics Investigations* 3(97) (2015) 95.
12. V.N. Bondarenko et al. Production of double-charged  $^4\text{He}$  ions beams on the small-sized electrostatic accelerator "SOKOL". *Vestnik BGU. Seriya 1: Fizika, Matematika, Informatika* 3 (2015) 58. (Rus)

Надійшла 15.03.2017  
Received 15.03.2017