

ИСТОЧНИК МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ ДЛЯ УСТАНОВКИ «СОКОЛ» (стендовые испытания)

С.Г. Карпуть

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

E-mail: karpus@kipt.kharkov.ua

Представлено описание конструкции источника многозарядных ионов (ИМИ) и результаты предварительных стендовых испытаний. Исследованы следующие характеристики ИМИ: зависимость тока разряда (I_p) и суммарного тока (I_t) ионов, извлекаемых из источника, от потенциала анода при постоянном напуске рабочего газа; зависимость I_p и I_t от величины напуска рабочего газа при фиксированном потенциале анода; определен зарядовый состав ионов пучка и соотношение между токами ионов различной зарядности; выбрана оптимальная оптическая система первичного формирования пучка на основе измерения профилей пучка, определения радиусов пучка и углов расходимости.

В настоящее время ионно-пучковые технологии широко используются как в научных исследованиях, так и в производстве:

- для исследования изменения свойств различных материалов под действием облучения с целью прогнозирования поведения этих материалов в экстремальных условиях эксплуатации (атомная энергетика, космическое пространство);
- для модификации свойств материалов;
- для получения материалов с заданными свойствами, в том числе наноструктурных материалов.

В 2005 г. на аналитической ядерно-физической установке «Сокол» был создан канал для ионного облучения материалов [1]. Используемый на ЭСУ «Сокол» радиочастотный источник ионов позволяет получать только однозарядные ионы газов, поэтому энергия ионов ограничивается максимальным потенциалом на высоковольтном электроде. С целью расширения аналитических возможностей установки «Сокол», а также расширения диапазона энергии ионов, используемых для облучения материалов, разрабатывается источник многозарядных ионов газов.

Для получения многозарядных ионов необходимо выполнение следующих условий:

- наличие в разряде высокоэнергетичных электронов, способных проводить ионизацию атомов до высоких значений зарядности, и высокая их концентрация ;
- максимально возможное значение произведения плотности электронов на время удержания ионов в плазме;
- низкая концентрация нейтральных атомов для уменьшения потерь зарядности ионов в результате перезарядки на атомах.

Кроме этого к конструкции ИМИ предъявляются дополнительные требования, определяемые условиями его эксплуатации на конкретном ускорителе. Источник ионов ускорителя «Сокол» должен удовлетворять следующим условиям:

- малый расход рабочего газа ($Q < 10^{-4}$ (м³·Па)/с) для обеспечения высокого вакуума в ускорительной трубке;
- потребляемая мощность не более 150 Вт;
- источник должен иметь незначительную массу (порядка 3...4 кг), чтобы не перегружать трубку ускорителя горизонтального типа, и малые габариты для размещения в высоковольтном кондукторе;
- простота в управлении;
- срок службы более 150 ч.

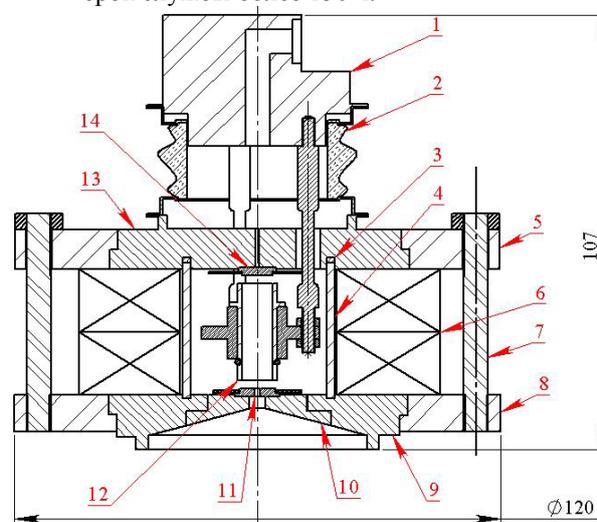


Рис.1. Схема ИМИ:

- 1 – фланец анодный; 2 – изолятор;
- 3 – уплотнение; 4 – цилиндрическая вставка (сталь 12X18H10T); 5 – фланец верхний накладной (сталь 12X18H10T); 6 – магниты постоянные;
- 7 – штилька; 8 – фланец нижний накладной (сталь 12X18H10T); 9 – фланец нижний (сталь 10);
- 10 – вставка (сталь 10); 11 – катод с отверстием эмиссии; 12 – анод цилиндрический;
- 13 – фланец верхний (сталь 10); 14 – катод

Разработана конструкция ИМИ с учетом перечисленных требований – это источник ионов с разрядом Пеннинга с холодным катодом и

продольным извлечением ионов. Схема источника показана на рис. 1.

Корпус источника состоит из катодных фланцев (9, 13) и цилиндрической вставки (4). Катодные фланцы стянуты между собой с помощью накидных фланцев (5, 8) и шпилек (7). Катоды (11, 14) изготовлены из тантала и крепятся к катодным фланцам. Анод источника (12) изготовлен из молибдена и крепится на шпильках к анодному фланцу (1).

Однородное магнитное поле в разрядной камере между катодами создается постоянными магнитами (6) и катодными фланцами (9, 13). Диаметр фланцев выбран оптимальным для получения максимальной магнитной индукции при данных геометрических размерах магнитов ($B=1200$ Гс).

Проведены предварительные испытания ИМИ с использованием в качестве рабочего газа неона. На рис. 2 приведена зависимость тока разряда (I_p) и суммарного тока ионов (I_t), извлекаемых из источника, от разности потенциалов «анод-катод» (U_a) при постоянном напуске рабочего газа.

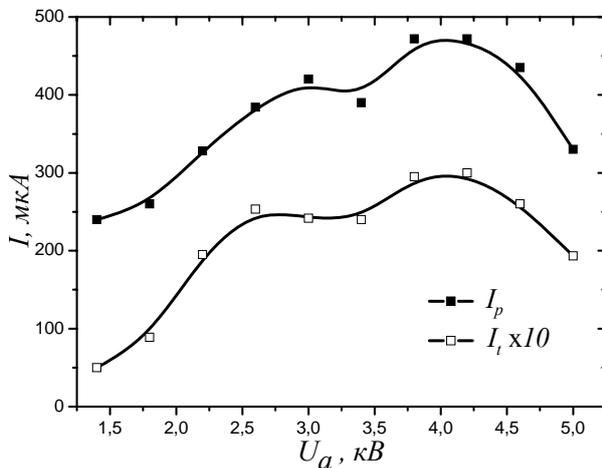


Рис. 2. Зависимость тока разряда I_p и общего тока I_t от разрядного напряжения U_a при вытягивающем напряжении $U_{\text{выт}}=12$ кВ и напуске газа $Q=3,9 \cdot 10^{-5}$ ($\text{м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$)

На представленных зависимостях наблюдается два максимума: первый при значении $U_a \approx 2,8$ кВ и второй — $U_a \approx 4,2$ кВ. Аналогичный эффект наблюдался авторами [2, 3]. Данный эффект объясняется наличием оптимальных условий для горения разряда, которые определяются соотношением величин разрядного напряжения U_a , давления рабочего газа (напуска газа Q) и величины магнитной индукции B .

На рис.3 показана зависимость тока разряда и тока извлекаемых ионов от напуска газа при фиксированных потенциалах на аноде, соответствующих максимумам токов на рис.2. Из этих зависимостей следует, что при данных значениях U_a при увеличении напуска рабочего газа возрастает как ток разряда, так и общий ток извлекаемых ионов.

Важной характеристикой ИМИ является выход многозарядных ионов. На рис. 4 представлена

зависимость выхода многозарядных ионов от разности потенциалов «анод-катод» при одном из режимов работы ИМИ. Из рисунка видно, что эта зависимость тождественна зависимости I_p и I_t (см. рис.2).

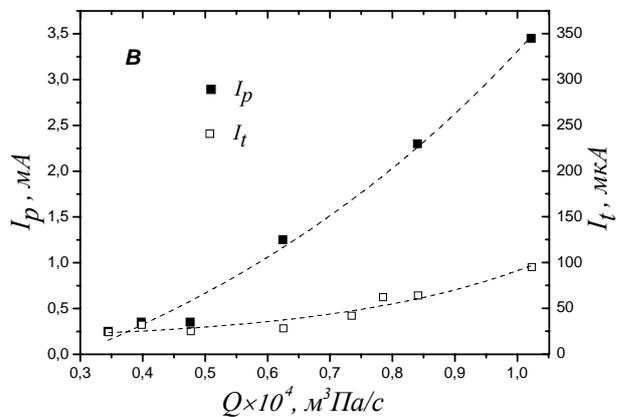
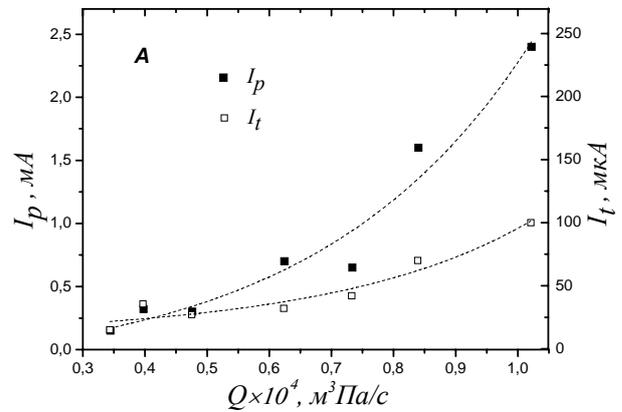


Рис. 3. Зависимости разрядного тока I_p и суммарного тока I_t от напуска газа Q :
A — $U_a=2,8$ кВ; **B** — $U_a=4,2$ кВ.
 Вытягивающее напряжение $U_{\text{выт}}=15$ кВ

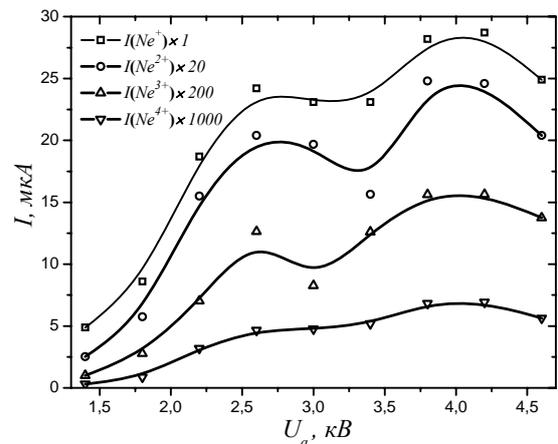


Рис. 4. Зависимость токов многозарядных ионов неона (Ne^+ , Ne^{2+} , Ne^{3+} , Ne^{4+}) от U_a при $Q=3,9 \cdot 10^{-5}$ ($\text{м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$) и $U_{\text{выт}}=12$ кВ

Существует два процесса образования многозарядных ионов — одноступенчатая ионизация и многоступенчатая. На рис. 5 показан относительный

выход многозарядных ионов и соотношение между сечениями образования многозарядных ионов неона при одноступенчатой ионизации. Из этих зависимостей видно, что основной вклад в образование многозарядных ионов вносят однократные столкновения.

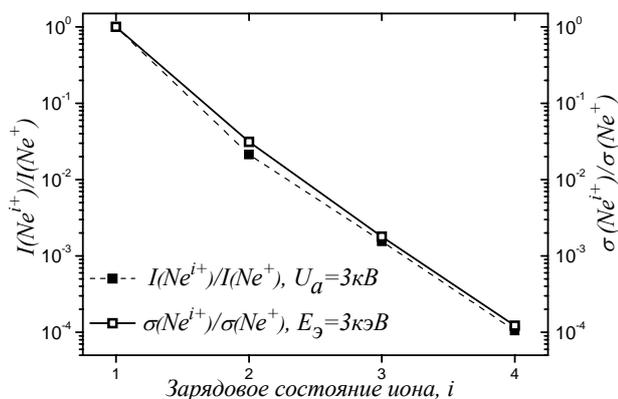


Рис.5. Сравнение измеренных соотношений выхода многозарядных ионов неона и соотношений значений сечений ионизации неона для одноступенчатой ионизации при энергии электронов $E_0=3$ кэВ [4]

Для согласования параметров пучка с ионно-оптическими характеристиками ускоряющей трубки необходимо знать характеристики пучка, такие как эмиттанс или диаметр пучка в определенном месте и максимальный угол расходимости пучка. Эти характеристики пучка ионов зависят от системы первичного формирования. Для выбора оптимальной системы первичного формирования пучка исследовано четыре системы с различными геометрическими размерами. Система первичного

формирования показана на рис.6. В дальнейшем эти системы обозначались в соответствии с параметрами $a \times b \times c$ ($4 \times 4 \times 4$, $2 \times 4 \times 4$, $2 \times 2 \times 4$, $2 \times 2 \times 2$). Для определения параметров пучка измерялось распределение плотности тока пучка по радиусу в двух сечениях на расстояниях 120 и 270 мм от отверстия эмиссии. После обработки результатов измерений определялись радиусы пучка R1 и R2 в этих сечениях и угол расходимости α в зависимости от ускоряющего напряжения. Полученные результаты представлены в таблице.

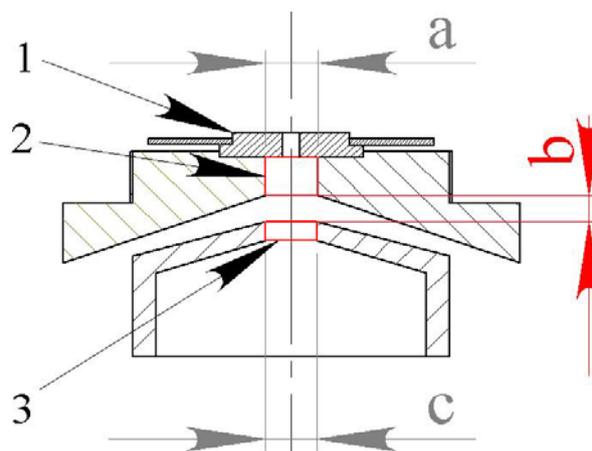


Рис.6. Система первичного формирования пучка:
1 — катод с отверстием эмиссии $\varnothing 1$ мм;
2 — экспандер (диаметр экспандера a , мм);
3 — экстрактор (диаметр отверстия c , мм);
 b — расстояние между экспандером и экстрактором, мм

Параметры системы	$U_{\text{выт}} = 15$ кВ				$U_{\text{выт}} = 12$ кВ				$U_{\text{выт}} = 9$ кВ				$U_{\text{выт}} = 6$ кВ			
	$4 \times 4 \times 4$	$2 \times 4 \times 4$	$2 \times 2 \times 4$	$2 \times 2 \times 2$	$4 \times 4 \times 4$	$2 \times 4 \times 4$	$2 \times 2 \times 4$	$2 \times 2 \times 2$	$4 \times 4 \times 4$	$2 \times 4 \times 4$	$2 \times 2 \times 4$	$2 \times 2 \times 2$	$4 \times 4 \times 4$	$2 \times 4 \times 4$	$2 \times 2 \times 4$	$2 \times 2 \times 2$
$\alpha, ^\circ$	3,23	2,12	2,42	3,17	3,2	2,74	3,25	3,1	3,42	2,95	3,14	3,2	3,81	3,03	3,26	3,6
R1	6,26	6,43	5,9	6,5	6,17	6,6	6,45	6,16	6,4	5,77	6,66	6,54	6,4	6,85	6,8	6,4
R2	14,6	11,9	12,1	14,6	14,4	13,6	14,8	14,2	15,2	13,3	14,7	14,7	16,2	14,6	15,1	15,7
$I, \mu\text{кА}$	88	64	76	84	74	54	64	72	48	44	50	56	40	28	33	36

Исходя из полученных результатов, можно сказать, что оптимальной системой первичного формирования пучка является система $2 \times 4 \times 4$. Эта система при вытягивающем напряжении $U_{\text{выт}}=15$ кВ формирует пучок, который на расстоянии 120 мм от отверстия эмиссии имеет радиус 6,4 мм (для 80% от общего извлекаемого тока), половинный угол расходимости около 2° .

Таким образом, предварительные испытания данного источника многозарядных ионов показали, что его характеристики удовлетворяют требованиям для эксплуатации на ускорителе «Сокол».

Необходимо проведение дальнейших исследований для выбора оптимальных параметров ИМИ.

Автор выражает благодарность коллективу сотрудников за активное участие в организации проведенных исследований, а также в обработке и обсуждении полученных результатов, а именно: Пистряку В.М., Кузьменко В.В., Зацу А.В. и Глазуну Л.С.

ЛИТЕРАТУРА

1. L.S. Glazunov, A.V. Goncharov, A.V. Zats, S.G. Karpus, V.V. Kuz'menko, V.V. Levenets,

V.M. Pistryak, V.I. Sukhostavets. Channel for ion irradiation of materials at the accelerator "Sokol" // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigation"*. 2006, №2, p.184-186.

2. H. Baumann, K. Bethge. PIG ion source with end extraction for multiply charged ions // *NIM*. 1974, №122, p.517-525.

3. В.М. Пистряк, В.В. Кузьменко, Ю.З. Левченко. Источник многозарядных ионов газов для электростатических ускорителей // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Общая и ядерная физика»*. 1980, №2, с. 69–70.

4. V.L. Schram, et al. // *Physica*. 1966, №32, p. 185-196.

Статья поступила в редакцию 10.09.2008 г.

ДЖЕРЕЛО БАГАТОЗАРЯДНИХ ІОНІВ ДЛЯ УСТАНОВКИ «СОКОЛ» (стендові випробування)

С.Г. Карпуть

Представлено конструкцію джерела багатозарядних іонів (ДБІ) та результати попередніх стендових випробувань. Досліджено наступні характеристики ДБІ: залежність струму розряду (I_p) та загального струму (I_t) іонів, отриманого з джерела, від потенціалу анода при постійному напуску робочого газу; залежність I_p і I_t від величини напуску робочого газу при фіксованому потенціалі анода; визначено зарядовий склад іонів пучка та співвідношення між струмами іонів різного заряду; вибрана оптимальна оптична система первинного формування пучка на основі виміряних профілів пучка, визначених радіусів пучка та кутів розходження.

ION SOURCE OF MULTIPLY CHARGED IONS FOR THE "SOKOL" FACILITY (bench tests)

S.G. Karpus

The design description of multiply charged ions source (MIS) and results of preliminaries bench tests are presented. Such characteristics of MIS were studied: dependence of the discharge current (I_d) and total ion current (I_t), which were extracted from the source, on the anode potential for constant gas flow; dependence of I_d and I_t on the value of gas flow for constant anode potential; charge distribution of ion beam and ratio between charges states of ions were determined; optimal optic system for primary formation of ion beam on the base of measured ion beam profiles, radiuses of ion beam and angles of divergence, was chosen.