

P9-2001-138

Д.Л.Новиков

ОБЪЕМНЫЕ ИСТОЧНИКИ  $H^-$ -ИОНОВ

Постановка задачи повышения интенсивности непрерывного ускоренного пучка ионов в ускорителях циклотронного типа свыше 1 мА в целях их промышленного использования для получения технологических изотопов и медицинских препаратов, а также в перспективе для совместной работы ускорителя с энергетическим реактором по схеме «driving energy-amplifier», потребовала адекватной разработки и создания высокопроизводительных ионных источников с малым эмиттансом пучка. Внутренние дуговые источники ионов типа PIG и источники типа дуоплазмотрон во внешних системах инъекции, хорошо зарекомендовавшие себя в предшествующие годы, оказались не пригодными для поставленной задачи, прежде всего, из-за большой величины эмиттанса пучка на выходе из источника, являющегося следствием большого разброса поперечного импульса образующей плазмы.

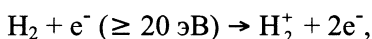
На смену названным типам источников пришли высокопроизводительные источники, обеспечивающие на их выходе пучок ионов с малым эмиттансом, так называемые объемные источники типа мальтикасп. Этот тип источника ионов имеет, как правило, рабочую камеру объемом, превышающим 1 л, и следовательно, может быть использован только в схемах внешней инъекции. С использованием системы внешней инъекции и вышеназванного источника получены максимальные токи ускоренного пучка на действующих циклотронах.

На циклотроне «CYCLON-30» фирмы IBA получен ток H<sup>+</sup>-ионов (1,5–3) мА [1], на циклотроне «TR-30» фирмы Ebco Technology 2,5 мА, на модели циклотрона той же фирмы превышен ток 3,6 мА [2].

Первое предложение по использованию фильтрующего магнитного поля для разделения разрядной области источника на две части поступило от Бэкала (M. Basal), опубликованное в работе [4] в 1977 г. При дальнейших совершенствованиях и разработках объемного источника ионов [5–8] было использовано по крайней мере три технологических новшества. Во-первых, это использование постоянных магнитов из кобальто-самариевых сплавов (SmCo<sub>5</sub>), создающих продольное магнитное поле величиной до 3,5 кГс для удержания газоразрядной плазмы источника в объеме его камеры. Во-вторых, это использование

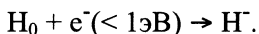
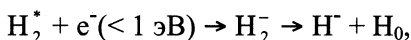
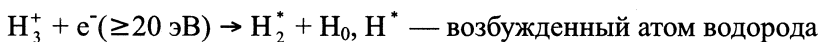
фильтрующих магнитов с поперечным магнитным полем величиной  $\sim 200$  Гс, располагаемых в непосредственной близости от области экстракции. При этом это поперечное магнитное поле создает условия для существования двух областей в разрядной камере источника ионов: «горячей» с энергией свободных электронов  $W_e \sim (20 \div 45)$  эВ и «холодной», с энергией свободных электронов  $W_e \sim (1 \div 1,5)$  эВ. В результате в горячей части камеры происходит накопление свободных энергичных электронов, которые создают газоразрядную плазму и генерируют возбужденные молекулы водорода  $H_2^*$ . Одновременно магнитное поле фильтрующего магнита отклоняет все быстрые электроны от оси разрядной камеры и в холодную область проходят только медленные (холодные) электроны, молекулы и ионы водорода. В холодной части камеры происходит интенсивный процесс образования  $H^-$ -ионов и дальнейшая их экстракция в область ускорения. В результате такой последовательности образования отрицательных ионов на выходе из источника наблюдается пучок частиц с очень низким значением эмиттанса.

Процесс образования  $H^-$ -ионов в источнике записывается в виде ряда формул:



$H_2 + \text{стенки камеры} \rightarrow H_2^*, H_2^*$  — возбужденная молекула водорода

$H_2^+ + H_2 \rightarrow H_3^+ + H_0$ , где  $H_0$  — атом водорода с тепловой энергией (thermal),



Третья технологическая новинка, которая значительно увеличивает выход из источника  $H^-$ -ионов, это использование катализирующего воздействия на процесс образования разрядной плазмы цезия (Cs). Увеличение выхода  $H^-$ -ионов примерно в 3–4 раза впервые экспериментально было обнаружено в работах сотрудников ИЯФ Сибирского отделения АН в Новосибирске (1972). В дальнейшем этот результат подтвердился в целом ряде экспериментов и широко используется в настоящее время при работе объемных источников ионов.

Хотя окончательного теоретического обоснования этому явлению не дано, в экспериментах наблюдаются следующие важные моменты процесса катализа.

1. При добавлении в разрядную полость цезия выход  $H^-$  и  $D^-$ -ионов линейно нарастает с ростом тока разрядной дуги, в отличие насыщения тока на выходе из ИИ без добавки в разрядную полость цезия.

2. При добавлении цезия параметры разрядной плазмы умеренно изменяются; плотность плазмы и ее потенциал увеличиваются на 10–30%, а ее температура на те же проценты уменьшается.

3. Число быстрых электронов в плазме уменьшается, а следовательно уменьшаются потери  $H^-$ -ионов из-за возможной рекомбинации.

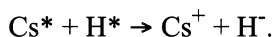
4. Значительно, в 4–5 раз уменьшается выход фоновых медленных электронов, прошедших через отверстие экстракции в область ускорения.

5. Спектроскопически наблюдаемые линии возбуждения атомов  $Cs^*$  располагаются на периферии разряда.

6. Нормализованный эмиттанс пучка  $H^-$ -ионов  $\epsilon_n$  на выходе из ИИ не изменяется в зависимости от подачи в плазму разряда  $Cs$  при тех же значениях плотности тока и энергии частиц пучка.

7. На основании предыдущего результата делается заключение, что  $H^-$ -ионы имеют ту же температуру и дрейфовую скорость независимо от того присутствует в разряде  $Cs$  или нет.

Механизм дополнительного канала образования  $H^-$ -ионов предполагает следующую схему:



Существенную многофункциональную роль в работе ИИ играет система экстракции ионов. Система экстракции имеет аксиально-симметричную форму и может состоять из трех или пяти электродов.

Первый электрод, примыкающий к разрядной плазме, обычно называется плазменным электродом (ПЭ). На нем рассеиваются и тормозятся быстрые электроны разрядной плазмы с помощью фильтрующего магнита, поэтому он изготавливается из молибдена (Mo) либо имеет интенсивное водяное охлаждение для снятия с него рассеянной мощности. Экспериментально было определено, что при подаче на плазменный электрод небольшого положительного потенциала относительно корпуса разрядной камеры ИИ  $\sim 1,5 \div 3$  В резко

уменьшается проход медленных сопутствующих  $H^-$ -ионам электронов через отверстие в электродах экстракции.

Вторым, следующим за плазменным электродом (ПЭ), называют экстрагирующий электрод (ЭЭ). На этот электрод подается только часть полного экстрагирующего потенциала с тем, чтобы в пространстве, следующем за ЭЭ, убрать сопутствующие электроны с меньшими энергетическими затратами. Так, например, в ИИ, разработанном для ускорительного комплекса ТРИУМФ, на первый экстрагирующий электрод подается потенциал  $U_1 = +3$  кВ из полных 25 кВ. В тело ЭЭ-электрода вмонтируются небольшие постоянные магниты, назначение которых заключается в отклонении от оси системы медленных электронов, которые проходят сюда вместе с  $H^-$ -ионами. Отклоненные медленные электроны собираются на третий электрод системы экстракции, обозначаемый как электрод подавления электронов (ЭПЭ). На четвертый электрод системы экстракции подается ускоряющий потенциал, который определяет окончательную энергию ионов  $H^-$  на выходе из ИИ. Пятый электрод системы является заземленным, если источник ионов используется самостоятельно и не размещается на специальной платформе ускоряющей колонны.

Для каждого конкретного случая форма электродов системы экстракции, расстояние между ними, распределение требуемых потенциалов и другие параметры определяются компьютерным расчетом с использованием программы AXCEL [16].

Использование многоэлектродной системы экстракции с проходным отверстием  $\varnothing = 6$  мм во всех электродах способствует образованию достаточного сопротивления потоку газа, который образуется в результате подачи рабочего газа (водорода) в объем разрядной камеры источника ионов. При расходе газа  $Q_r = 3 \div 15$  см<sup>3</sup>/мин в разрядной камере ИИ фиксируется давление в пределах  $(1,5 \div 0,7) \cdot 10^{-2}$  Тор. В то же время для эффективной проводки пучка  $H^-$ -ионов в область ускорения желательно иметь давление по тракту проводки в пределах  $\sim 5 \cdot 10^{-7}$  Тор. Поэтому в области экстракции желательно иметь эффективную селективную откачку отработанного газа с производительностью в несколько  $(3 \div 5) \cdot 10^3$  л/с (как показано на рис. 1, 3).

Наиболее разработанными конструкциями объемных ионных источников типа мальтикасп, которые подвергались постоянным, периодическим модернизациям в течение двух последних десятилетий, являются конструкции ИИ комплекса ТРИУМФ в Канаде [2, 9–11],

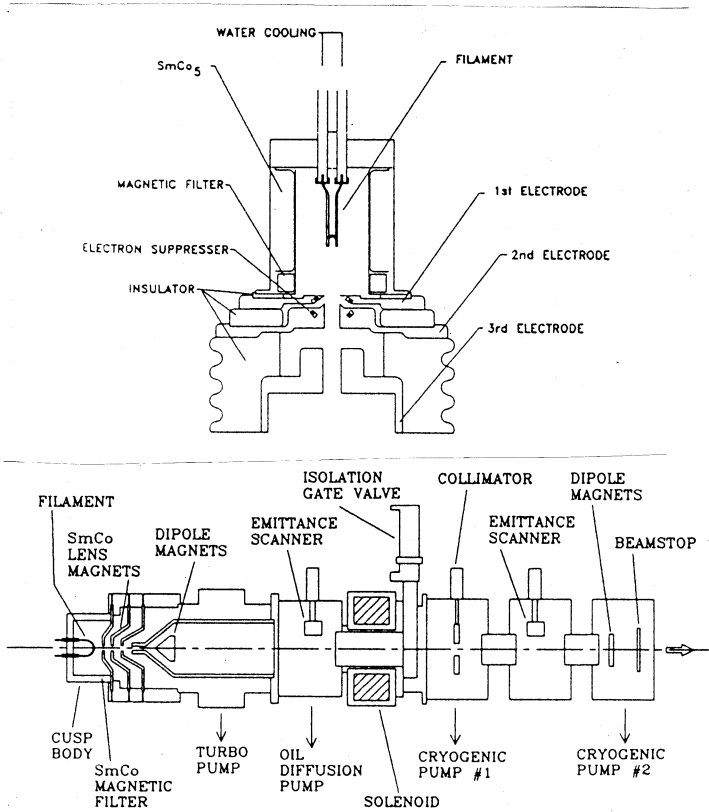


Рис.1. Схематический рисунок объемного источника ионов, системы экстракции и диагностики

источники фирмы АЕА Technology Лаборатории Калхэма (Culham Lab.) в Англии [1, 12, 17] и целый ряд источников разработанных в колыбели их создания — Национальной лаборатории им.Лоуренса, в Беркли (LBNL) (США) [5÷8, 13÷15].

Первоначально в системе внешней инжекции в ускорительный комплекс ТРИУМФ использовался ИИ типа Элэкса [10]. Затем после пионерских работ того же Элэкса по созданию объемного источника с магнитным фильтром, получившим впоследствии термин «мальтикаспа», исходный вариант этого источника с накаливаемым катодом был адаптирован группой специалистов под руководством Т.Куо для комплекса ТРИУМФ. После внесения в конструкцию ИИ ряда усовершенствований объемный источник ТРИУМФ обеспечивает

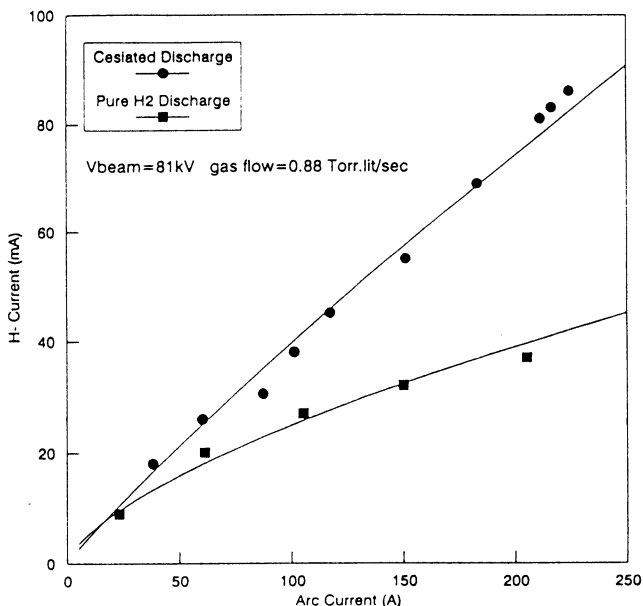


Рис. 2. Зависимости тока H-ионов из источника при постоянном напряжении на дуге от величины тока дуги. Квадратики — чистый H<sub>2</sub> разряд, кружочки — разряд с добавлением цезия

непрерывный ток H-ионов величиной 25 мА с нормализованным эмиттансом пучка  $\epsilon_n = 0,6 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$  [2]. Схематический рисунок источника и размещения его в головной части тракта инжекции представлен на рис. 1. Рабочую камеру ИИ диаметром  $\varnothing 10 \div 15$  см и длиной  $15 \div 20$  см изготавливают из медного цилиндра. В боковую поверхность цилиндра вставлено 10 стержневых постоянных магнитов из SmCo<sub>5</sub>, которые создают продольное магнитное поле с максимальной величиной индукции 3,2 кГс. Магнитное поле обеспечивает удержание плазменного разряда у оси цилиндра. В боковой поверхности камеры имеются также каналы для прохождения охлаждающей воды, рассчитанной на снятие тепловой нагрузки, эквивалентной 2–3 кВт.

Дуговой разряд в полости цилиндрической камеры с параметрами  $I_d = 20\text{--}140$  А и  $U_d = 50\text{--}150$  В поддерживается подачей водорода H<sub>2</sub> с расходом газа 3–10 см<sup>3</sup>/мин и эмиссией термоэлектронов с нити накала, размещенной на тыльной крышке цилиндрической камеры ИИ. Нить

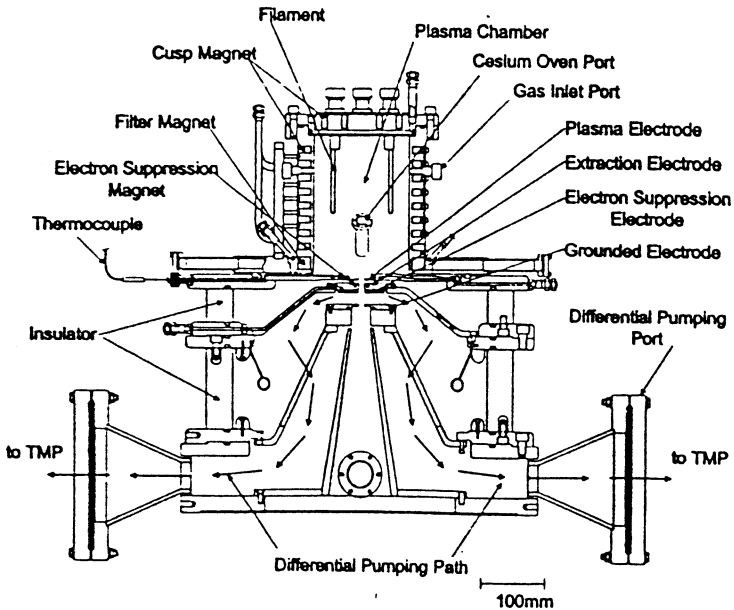


Рис.3. Разрез источника H-ионов для линейного ускорителя, разработанного в ИАЭ (Япония)

накала выполнена из W проволоки  $\varnothing 1,5 \pm 2$  мм и введена на 5–10 см внутрь разрядной камеры ИИ. Магнитный фильтр размещен в разрядной камере в непосредственной близости от первого электрода системы экстракции. На плазменный электрод подается незначительный положительный потенциал 2–5 В, он же является приемником для отфильтрованных из плазменного разряда быстрых 45–20 эВ электронов. В тело первого и второго электродов имплантированы 4 постоянных магнита для селекции и отклонения медленных электронов  $1 \div 2$  эВ, которые проходят через отверстия в системе экстракции совместно с H-ионами. Вмонтированные в 1-й и 2-й электроды магниты обеспечивают такие условия, при которых  $\int Bdl = 0$  в целом по области экстракции. Положительный вытягивающий потенциал, подаваемый на второй электрод системы, близок к значению  $U_2 = 3$  кВ. Второй электрод является одновременно приемником медленных электронов, прошедших через отверстие первого электрода совместно с ионами H. На третий



$\epsilon_N = 0,16 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ . При его использовании на циклотроне CYCLON-30 предполагается обеспечить полный ускоренный пучок с током до 3 мА.

В обзорном докладе Петерса из лаборатории ДЕЗИ, представленном на 6-ю конференцию по ионным источникам (Япония, 2000 г.), результаты Хольма для объемного источника с накалимым катодом поставлены в ряд лучших достижений на 1995 г. и зафиксированы следующие величины: для режима работы ИИ без введения цезия 45 мА и с цезием — 90 мА [18].

На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости тока  $\text{H}^-$ -ионов из источника от тока дуги при фиксированном напряжении на дуге  $U_d = 100 \text{ В}$  для двух режимов работы источника [12].

В Национальной лаборатории физики высоких энергий (КЕК, Япония) в 1990 г. использовался объемный ИИ с током пучка  $\text{H}^-$  до 20 мА [18]. На 6-ой международной конференции по ионным источникам был представлен доклад [19] о разработке объемного ИИ  $\text{H}^-$ -ионов для протонного линейного ускорителя, сооружаемого в Японии исследовательским институтом атомной энергии. Ток  $\text{H}^-$ -ионов величиной 40 мА при плотности тока  $j = 80 \text{ мА/см}^2$  был получен в импульсном режиме при duty factor 5 %. Конструкция этого ИИ приведена на рис. 3. Полуцилиндрическая камера источника имеет размеры:  $\varnothing = 150 \text{ мм}$ , длина  $l = 200 \text{ мм}$ , что составляет объем  $\sim 3,5 \text{ л}$ . Разрядная плазма образуется дуговым разрядом с помощью двух нитей накаливания из W. Длина нитей накала  $l_n = 220 \text{ мм}$  при их диаметре 1,5 мм. Постоянные  $\text{SmCo}_5$  магниты располагаются вокруг камеры источника и создают удерживающее разрядную плазму магнитное поле. Магнитный фильтр делит объем камеры на две области с соответствующей электронной температурой. Специальный тигель, содержащий металлический цезий, расположен перед входом в отверстие первого электрода системы экстракции. Пары цезия вводятся в разрядную камеру из тигеля при достижении в нем температуры  $220^\circ \text{C}$ . Количество цезия, введенного в камеру, оценивается величиной порядка 100 мг.

Система экстракции пучка ионов из разрядной камеры состоит из четырех электродов: плазменного электрода (PE), экстрагирующего электрода (EXE), электрода подавления электронов (ESE), заземленного электрода (GE).  $\text{H}^-$ -ионы экстрагируются через отверстие  $\varnothing 8 \text{ мм}$ , одинаковое для всех электродов. Расстояния между электродами выбраны

$\epsilon_N = 0,16 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ . При его использовании на циклотроне CYCLON-30 предполагается обеспечить полный ускоренный пучок с током до 3 мА.

В обзорном докладе Петерса из лаборатории ДЕЗИ, представленным на 6-ю конференцию по ионным источникам (Япония, 2000 г.), результаты Хольма для объемного источника с накаливаемым катодом поставлены в ряд лучших достижений на 1995 г. и зафиксированы следующие величины: для режима работы ИИ без введения цезия 45 мА и с цезием — 90 мА [18].

На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости тока  $H^-$ -ионов из источника от тока дуги при фиксированном напряжении на дуге  $U_d = 100$  В для двух режимов работы источника [12].

В Национальной лаборатории физики высоких энергий (КЕК, Япония) в 1990 г. использовался объемный ИИ с током пучка  $H^-$  до 20 мА [18]. На 6-ой международной конференции по ионным источникам был представлен доклад [19] о разработке объемного ИИ  $H^-$ -ионов для протонного линейного ускорителя, сооружаемого в Японии исследовательским институтом атомной энергии. Ток  $H^-$ -ионов величиной 40 мА при плотности тока  $j = 80 \text{ мА/см}^2$  был получен в импульсном режиме при duty factor 5 %. Конструкция этого ИИ приведена на рис. 3. Полуцилиндрическая камера источника имеет размеры:  $\varnothing = 150$  мм, длина  $l = 200$  мм, что составляет объем  $\sim 3,5$  л. Разрядная плазма образуется дуговым разрядом с помощью двух нитей накаливания из W. Длина нитей накала  $l_n = 220$  мм при их диаметре 1,5 мм. Постоянные  $\text{SmCo}_5$  магниты располагаются вокруг камеры источника и создают удерживающее разрядную плазму магнитное поле. Магнитный фильтр делит объем камеры на две области с соответствующей электронной температурой. Специальный тигель, содержащий металлический цезий, расположен перед входом в отверстие первого электрода системы экстракции. Пары цезия вводятся в разрядную камеру из тигеля при достижении в нем температуры  $220^\circ\text{C}$ . Количество цезия, введенного в камеру, оценивается величиной порядка 100 мг.

Система экстракции пучка ионов из разрядной камеры состоит из четырех электродов: плазменного электрода (PE), экстрагирующего электрода (EXE), электрода подавления электронов (ESE), заземленного электрода (GE).  $H^-$ -ионы экстрагируются через отверстие  $\varnothing 8$  мм, одинаковое для всех электродов. Расстояния между электродами выбраны

равными: между (PE) и (EXE) — 2,6 мм, между (EXE) и (ESE) — 2,5 мм, между (ESE) и (GE) — 16,4 мм.

Плазменный электрод (PE) изготовлен из молибдена (Mo). Поскольку параметры разогретой плазмы и результат экстракции существенно зависят от температуры этого электрода, он снабжен термопарой, с помощью которой контролируется температура в пределах 200–330 °С. Второй электрод системы экстракции (EXE) изготовлен из 10-мм медной пластины, он имеет интенсивное водяное охлаждение и пазы для размещения в них постоянных магнитов, которые создают дипольное магнитное поле, препятствующее проникновению холодных электронов в ускорительный зазор. (ESE) электрод перехватывает на себя те электроны, которые просочились через электрод (EXE).

Для того, чтобы уменьшить потери пучка Н<sup>+</sup>-ионов из-за столкновения с молекулами остаточного газа (Н<sub>2</sub>) в линиях транспортировки, использованы для дифференциальной откачки 2 турбомолекулярных насоса со скоростью откачки  $S=1300$  л/с. При использовании этих насосов давление в тракте улучшилось и составило величину  $7,5 \cdot 10^{-6}$  Тор.

Мощность дугового разряда в импульсе изменялась в экспериментах от 10 до 40 кВт. Длительность импульса  $\tau=1$  мс при частоте посылок до  $f=50$  Гц (duty ~ 5%). При параметрах  $U_{arc}=120$  В,  $U_{эк}=70$  кВ максимальный ток Н<sup>+</sup>-ионов  $I_{max}=45$  мА. Измерения эмиттанса при токе пучка 33 мА показали, что его величина составляет  $\epsilon_N=0,15 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ .

Основным недостатком объемного источника с накалимым катодом является его относительная недолговечность, которая определена сроком службы накалимого катода. Для лучших экземпляров ИИ срок службы катода составляет 100–500 часов.

С целью увеличения долговечности источника в Национальной лаборатории им. Лоуренса (LBNL) был разработан вариант объемного ИИ, дуговой разряд в котором поддерживался импульсом высокочастотного напряжения на частотах  $f \sim 2$  МГц. Такие источники разрабатывались для использования в инжекционных трактах линейных ускорителей, которые работают как правило в макроимпульсном режиме [20, 21, 22].

На рис. 4 представлен разрез источника с высокочастотным возбуждением [19]. Устройство источника с ВЧ-возбуждением практически повторяет устройство объемного ИИ с накалимым катодом.

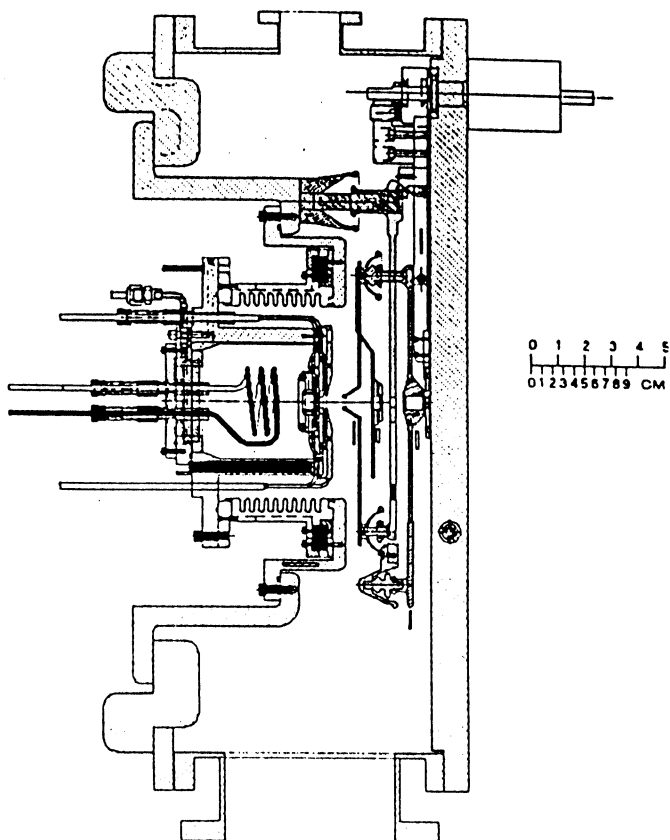


Рис. 4. Схематический разрез объемного источника H<sup>+</sup>-ионов с ВЧ-возбуждением для установки SNS (США)

Разрядная камера ИИ представляет собой цилиндр диаметром  $\varnothing 10$  см и длиной  $l = 10$  см. Цилиндр разрядной камеры закрыт с одной стороны тыльной крышкой, с другой стороны плазменным электродом. Разрядная плазма удерживается продольным магнитным полем, которое создается постоянными магнитами из самария-кобальта ( $\text{SmCo}_5$ ), которые вставлены в цилиндр и тыльную крышку разрядной камеры. ВЧ-мощность вводится внутрь разрядной камеры индуктивной связью при помощи двухвитковой спирали (см. рис. 4). Спираль изготовлена из медной трубки, покрытой изолирующей фарфоровой массой.

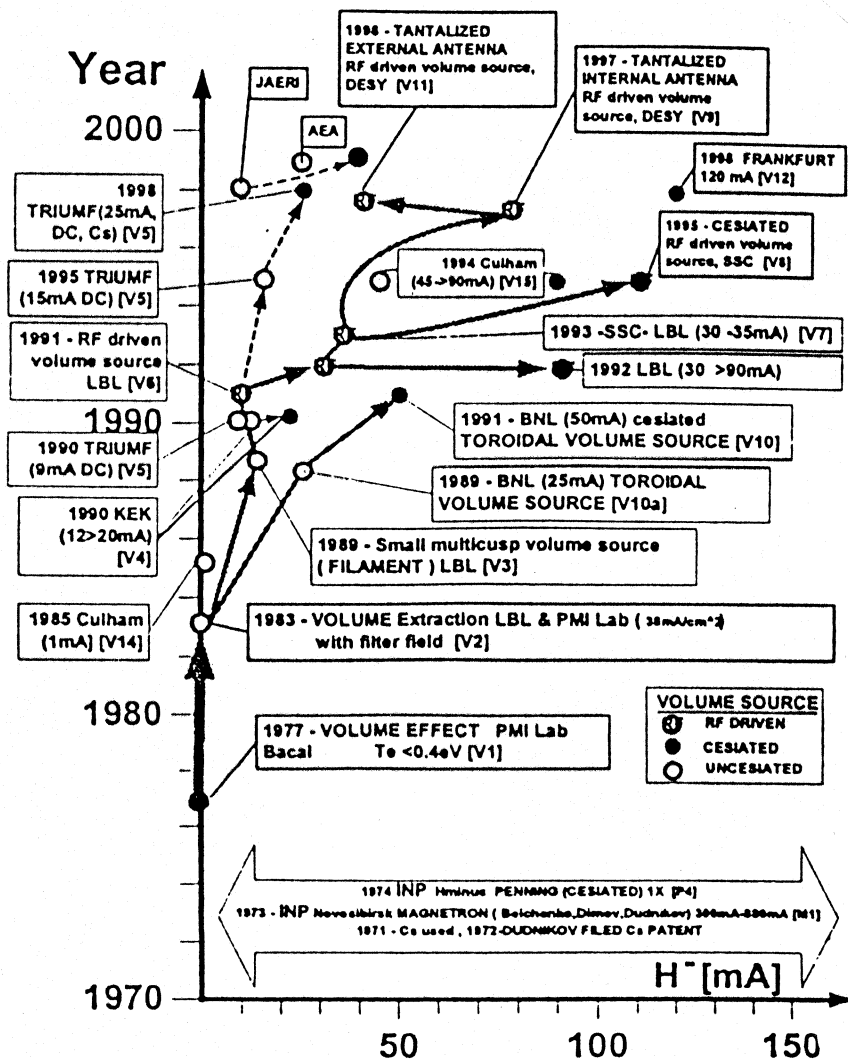


Рис.5. Сводная таблица, отражающая историю развития объемных источников H<sup>-</sup>-ионов

Частота генерации ВЧ-импульса составляет  $f = 2$  МГц, длительность импульса  $\tau = 1$  мс, а частота следования импульсов  $F$  изменяется в пределах  $F = 40 \div 60$  Гц. Мощность генератора, создающего ВЧ-импульсы, составляет  $20 \div 50$  кВт (Duty factor  $\sim 5\%$ ).

Два постоянных магнита в виде ферромагнитных стержней расположены вблизи плазменного электрода и создают локальное поперечное магнитное поле величиной до 200 Гс, разделяя разрядную камеру ИИ на область «горячей» и «холодной» плазмы. Быстрые электроны разрядной плазмы отклоняются фильтрующим магнитным полем от оси разряда и собираются на специальном цилиндре (collar), установленном перед входом в отверстие плазменного электрода. В следующих за плазменным электродом электродах экстракции установлены дипольные магниты, которые отклоняют медленные электроны, сопутствующие извлеченным Н<sup>-</sup>-ионам. Отклоненные от оси электроны собираются на специальном электроде системы экстракции. Напряжение экстракции изменяется в пределах 35 ÷ 63 кВ. При напряжении  $U_3 = 63$  кВ получен ток Н<sup>-</sup>-ионов до 42 мА в импульсе длительностью  $\tau = 0,8$  мс с частотой посылок  $F = 60$  Гц.

Измерения эмиттанса пучка проводились при параметрах пучка Н<sup>-</sup>-ионов:  $W_3 = 63$  кВ  $I_n = 32$  мА. Из этих измерений получена величина нормализованного эмиттанса  $\epsilon_N = 0,27 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ .

Использование высокочастотного импульса вместо нити накала увеличило срок службы источника ионов для лучших экземпляров до 900 часов. Работы по увеличению срока службы ИИ продолжаются. Наиболее перспективными в этом направлении представляются работы, связанные с вынесением петли связи из рабочего объема источника. В этом случае в качестве материала для камеры ИИ применяется алюминооксидная керамика с соответствующими характеристиками. Использование керамики вместо меди продлевает непрерывный срок службы источника до тысяч часов.

Сводная таблица, отражающая историю развития объемных источников Н<sup>-</sup>-ионов типа «мальтикасп», представлена на рис. 5 [18], в таблице № 1 представлены основные параметры наиболее продвинутых разработок объемных источников Н<sup>-</sup>-ионов по состоянию на 2000 г. Из таблицы видно, что в настоящее время существуют надежно работающие источники Н<sup>-</sup>-ионов, обеспечивающие пучок Н<sup>-</sup>-ионов с током  $I_n = 30\text{--}40$  мА и нормализованным эмиттансом  $\epsilon_N = 0,16 \div 0,5 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ . Необходимо также отметить, что разработка и эксплуатация источников объемного типа требует значительных материальных и энергетических затрат, превышающих ординарные расходы на эксплуатацию источников ионов предшествующих поколений в несколько раз. Эти расходы приближаются к расходам на разработку и эксплуатацию таких

современных источников ионов, как источники типа ECR, обеспечивающие интенсивные пучки многозарядных ионов, и сравнимы с расходами на эксплуатацию собственно ускорительной установки.

*Объемные источники H<sup>-</sup>-ионов*

№ п/п	Лаборатория	Страна	Ток, ГМА	U, кВ	$\epsilon_N$ , мм-мрад	Duty %	Cz*	Расход газа**	Ссылка
1.	LBNL (SNS)	США	42	63	0,27	5	–	25	21
2.	BNL	США	30	35	0,4	0,25	–		23
3.	TRIUMF	Канада	25	25	0,6	100	5	5	2
4.	Culham	Великобритания	30	81	0,16	100	–	60	17
5.	Culham	Великобритания	90	81	0,16	100		60	12
6.	КЕК (ИНФП)	Япония	45	70	0,10	5	4	15	19
7.	Univ. Frankfurt	Германия	120	55	0,23	6	29	–	18
8.	DESY	Германия	40	60	0,4	0,05	без		18

\*Расход цезия в мг/день

\*\*Расход газа (H<sub>2</sub>) в SCCM (см<sup>3</sup>/мин).

**Литература**

1. Iongen Y. et al. «High Intensity Cyclotrons for Radioisotope Production or the Comeback the Positive Ions». // 14th Int. Conf. Cyclotrons, Cape Town, 1995. P.115.
2. Kuo T. et al. «Injection Study for High Current H<sup>-</sup> Cyclotrons». // 15 Int. Cycl. Conf., Caen, France, 1998. P.381.
3. Shempp A. «Low Energy Part of High Intensity Accelerators». // EPAC-94, London. V.1. P.231.
4. Bacal M. et al. // Phys. Rev. Lett. 1977. V.42. P.1538.
5. Ehlers K.W. et al. // Rev. Sci. Instr. 1983. V.54. P.677.
6. Ehlers K.W. et al. // R.S.I. 1984. V.55. P.57.
7. Ehlers K.W. et al. // R.S.I. 1985. V.56. P.364.
8. Ehlers K.W. et al. // R.S.I. 1988. V.59. P.453.
9. Dutto G. et al. // RSI. 1994. V.65. P.1189.
10. Frederiksson O.K. et al. «Conceptual Design of the Injection System for a 500 MeV H<sup>-</sup> Cyclotron». TRI-70-3. 1973.
11. Dutto G. et al. // 13th Int. Cycl. Conf. 1992. P.138.

12. Holmes A.I.T. et al. «Intense Negative Ion Source at Culham Laboratory». // RSI. 1994. V.65. P.1153.
13. Leung K.N. et al. «Optimization of  $H^-$  Production from a Small Multicusp Ion Source». // RSI. 1989. V.60. P.531.
14. Leung K.N. et al. «RF Driven Multicusp  $H^-$  Source». // RSI. 1991. V.62. P.100.
15. Leung K.N. et al. // RSI. 1993. V.64. P.970.
16. Whitson I.C. et al. // Comput. Phys. 1978. V.28. P.408.
17. Holmes A.I.T. «Intensity  $H^+$  and  $H^-$  Source». // EPAC-94, London, 1994. V.1. P.223.
18. Peters I. «Negative Ion Source for High Energy Accelerators». // RSI. 2000. V.71. P.1069.
19. Oguri H. et al. «Development of a  $H^-$  Ion Source for the High Intensity Linac». // RSI. 2000. V.71. P.975.
20. Soadatman K. et al. « $H^-$  RF Volume Ion Source for SSC». // RSI. 1994. V.65. P.1173.
21. Thomae R. et al. «Measurements on  $H^-$ -Source for Spallation Neutron Source Application». // RSI. 2000. V.71. P.1213.
22. Ka-Ngo Leung. «The Application and Status of the RF Driven Multi-Cusp Ion Source». // RSI. 2000. V.71. P.1064.
23. Weisheng Jing et al. «The Investigation of Negative Hydrogen Ion Source». // RSI. 1994. V.65. P.1242.

Рукопись поступила в издательский отдел  
10 июля 2001 года.



Новиков Д.Л.  
Объемные источники  $H^-$ -ионов

P9-2001-138

В работе приведено описание конструкций источников  $H^-$ -ионов объемного типа. Можно сделать вывод о том, что к настоящему времени существуют конструкции ионных источников, надежно обеспечивающие ток  $H^-$ -ионов величиной до 30–40 мА и с нормализованным эмиттансом  $\epsilon_N = 0,15-0,5 \pi \text{ мм} \cdot \text{мрад}$ .

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П.Джелепова ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2001

#### Перевод автора

Novikov D.L.  
Volume Cusp Sources of  $H^-$  Ions for High Current Accelerators

P9-2001-138

The description of constructions of cusp-type volume  $H^-$ -ion sources is presented. It is concluded that up today there exist constructions of volume ion sources possible to provided  $H^-$  ion current of about (30 + 40) mA with normalized emittance of  $\epsilon_N = (0.15 + 0.5) \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ .

The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2001

Редактор М.И.Зарубина. Макет Р.Д.Фоминой

Подписано в печать 04.10.2001  
Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. л. 0,95  
Тираж 280. Заказ 52880. Цена 1 р. 20 к.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
Дубна Московской области