

СЗУ5Л1
Г-362

4955 / 2-76

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



13/хн-76
9 - 9999

В.Георге, М.И.Михайлов, В.Г.Новиков,
В.П.Саранцев, Б.А.Шестаков

ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ
КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРИТЕЛЯ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ
ОНМУ ОИЯИ

1976

9 - 9999

В.Георге,* М.И.Михайлов, В.Г.Новиков,
В.П.Саранцев, Б.А.Шестаков

ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ
КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРИТЕЛЯ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ
ОНМУ ОИЯИ

*Физический институт, Бухарест, СРР



Введение

Среди многих проблем, стоящих на пути создания коллективного ускорителя, не последнее место занимает проблема дозированной загрузки электронного кольца ионами, выбранного для дальнейшего ускорения элемента.

В работе /1/ эта задача решается "медленным" /в течение всего цикла сжатия электронного кольца/ накоплением ионов из окружающего пространства. Возможно и формирование двухкомпонентного кольца путем встречной инжекции ионов и электронов. На установке в Карлсруэ /ФРГ/ осуществляется "быстрая" /за время ≈ 100 нкс/ загрузка сжатого электронного кольца ионами из предварительно сформированной с помощью механического прерывателя и системы щелей газовой струи /2/.

Важным преимуществом "быстрой" загрузки ионами предварительно сжатого до минимальных размеров электронного кольца является пространственное совпадение электронного и ионного тороидов. Это обеспечивает оптимальные условия дальнейшей ионизации захваченных ионов и удержания их в кольце при ускорении. При методах же загрузки кольца ионами в течение всего цикла сжатия или же при встречной инжекции, малый размер сечения ионного тороида оказывается больше соответствующего размера электронного тороида, т.к. амплитуды поперечных колебаний ионов при сжатии кольца уменьшаются медленнее амплитуд бетатронных колебаний электронов.

Кольцо, будучи сжатым до конечных размеров, оказывается окруженным "шубой" относительно слабо связанных с ним ионов.

Для коллективного ускорителя тяжелых ионов ОНМУ ОИЯИ предполагается осуществить процесс накопления ионов из импульсного потока атомов выбранного для ускорения элемента, пересекающего электронное кольцо на конечной стадии сжатия. Такой вариант загрузки позволяет регулировать и количество захваченных колец ионов и время загрузки /другими словами, зарядность ионов/. В случае "быстрой" загрузки кольца концами исходный поток нейтральных частиц должен удовлетворять следующим требованиям:

1. Поток должен быть сформирован геометрически так, чтобы максимальное число частиц пересекло объем электронного кольца.

2. Скорости частиц в потоке должны быть таковы, чтобы вероятность ионизации каждого атома электронами кольца была близка к единице. Для кольца с размерами $r_k = 4$ см, $2a = 0,2$ см и с полным числом электронов $N_e \approx 10^{14}$ /таковы ожидаемые параметры колец коллективного ускорителя тяжелых ионов ОНМУ ОИЯИ^{/3/} /, это условие дает, например, для потока ксенона значение скоростей нейтралов $v_a \ll 2 \cdot 10^5$ см/с. Скорости $v_a \sim 1 \cdot 10^5$ см/с, при которых ионизуется большая часть атомов, компромиссно удовлетворяют поставленным требованиям.

3. Время взаимодействия потока с электронным кольцом должно быть минимальным и, во всяком случае, не превышать 100 мкс /4,5/ /.

4. Полное число N_a частиц в потоке должно быть таким, чтобы для двухкомпонентного кольца выполнялось условие $N_i / N_e \leq 10^{-3}$ / N_i - полное число захваченных колец ионов/. С учетом условий 1-3, следовательно, необходимо $N_a \approx 10^{11}$.

В качестве источника импульсного потока атомов, в зависимости от конкретных условий и целей, предполагается использование одного из следующих типов источников:

а/ газодинамический^{/6/};

б/ плазменная пушка с газовым разрядом, создающая направленный поток атомов газообразного вещества;

в/ плазменная пушка с разрядом в вакууме и испарением материала электродов, создающая направленный поток атомов металлов /или твердого вещества/.

В данной работе приводятся предварительные результаты экспериментов с обоими типами плазменных источников и описание экспериментальной установки.

Экспериментальная установка

Принцип действия плазменной пушки хорошо известен^{/7-9/}. Поясним его вкратце на примере коаксиальной плазменной пушки, с которой проводились описанные ниже исследования. Принципиальная схема плазменной пушки и устройств ее питания приведена на рис. 1. Основными рабочими элементами коаксиальной плазменной пушки являются два электрически-изолированных друг от друга коаксиальных электрода /внешний - 1 и центральный - 2/, в промежутке между которыми при подготовке к работе создается необходимый вакуум. Рабочее напряжение на электроды /до 10 кВ/, подаваемое от предварительно заряженной емкости C_p , может быть включено постоянно или в определенный момент времени с помощью коммутатора /например, мощный тиратрон, разрядник/. Через систему отверстий 3 в центральном электроде при помощи быстродействующего электродинамического клапана 4, описанного в^{/6/}, в межэлектродное пространство пушки может напускаться дозированное количество газа / $0,5 \div 3 \cdot 10^{18}$ частиц за импульс/. Время напуска газа может изменяться в пределах /30 ÷ 250 мкс/ регулировкой клапана. Развитие разряда между электродами происходит или самопроизвольно /из-за ухудшения вакуума после напуска газа в межэлектродном объеме/, или инициируется с помощью специальных поджигающих электродов 5, запитанных от линии Блюмлайна. Большая часть газа в рабочем объеме пушки при этом ионизируется, однако заметная его доля, находящаяся в межэлектродном пространстве /по данным^{/10, 11/} / до 30% от первоначально напущенного в рабочий объем числа молекул/ остается в неионизованном состоянии. Ускорение плазменного сгустка

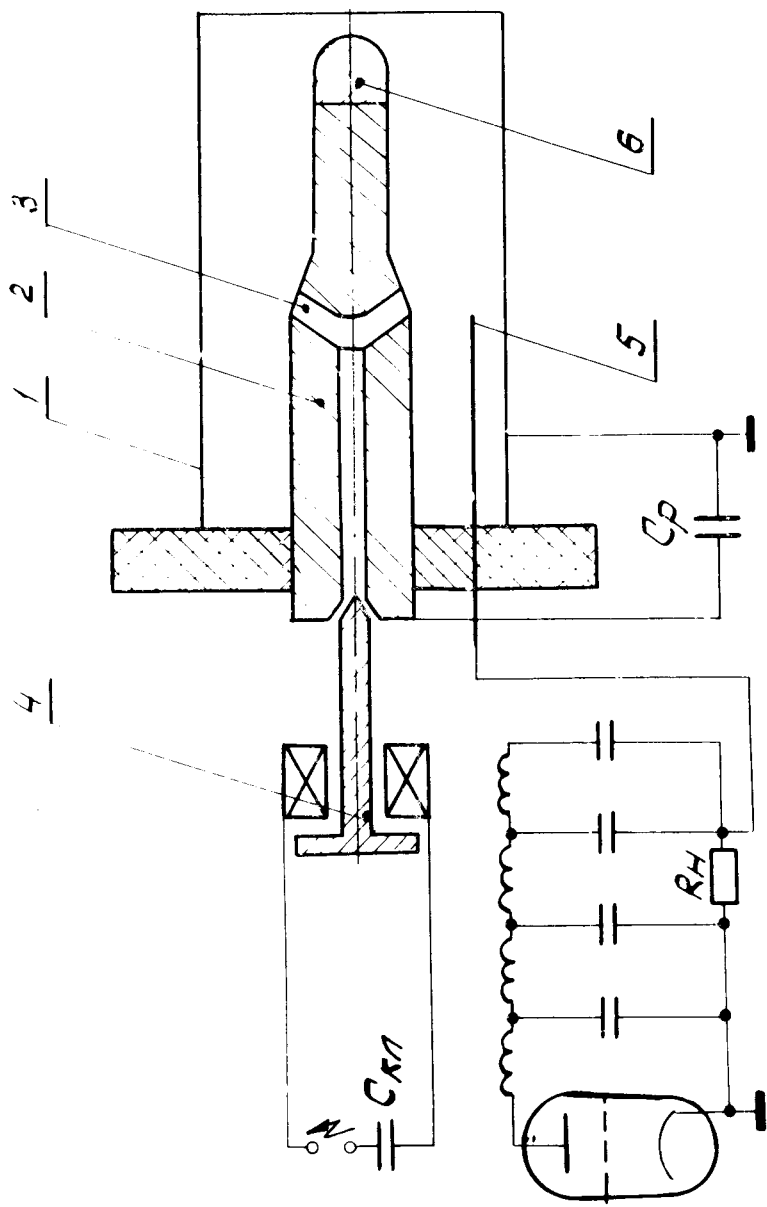


Рис. 1. Принципиальная схема плазменной пушки и устройства ее питания.

/вместе с находящимися в нем нейтралами/ вдоль оси пушки происходит за счет взаимодействия разрядного тока J с индукцией азимутального магнитного поля B , возникающего в межэлектродном объеме от тока, протекающего по центральному электроду. Присутствие в ускоряемом потоке плазмы нейтральных атомов объясняется, по-видимому, увлечением их в поток за счет соударений и благодаря частичной нейтрализации положительно заряженных ионов электронами плазмы в процессе ускорения.

Протекание через электроды пушки больших импульсных токов /до 10 кА/ приводит к эрозии электродов. Как было отмечено в /12/ и экспериментально обнаружено на нашей установке, эрозии в значительной мере подвергается конец центрального электрода /в этом месте велика плотность разрядного тока и напряженность электрического поля/. Во избежание этого центральный электрод плазменной пушки, работающей в режиме газового разряда, снабжен наконечником, изготовленным из эрозийно стойкого металла /у нас из вольфрама/. Таким образом, повышается чистота плазменного потока.

При работе плазменной пушки в режиме вакуумного разряда напуск газа через клапан не производится и основной разряд инициируется поджигающими электродами. Рабочим веществом при этом служат продукты эрозии материала электродов. В образовавшемся плазменном сгустке присутствуют заряженные и нейтральные частицы материала электродов, в основном материала наконечника. Поэтому электроды изготавливаются из более эрозийно стойкого металла, чем металл сменного наконечника. С целью получения плазменных сгустков, содержащих заряженные и нейтральные частицы только одного определенного металла, электроды пушки полностью изготавливаются из /или их рабочая поверхность покрыта тонким слоем/ такого металла. В дальнейшем выходящий из пушки плазменный сгусток проходит через разделительный конденсатор, на пластины которого подано постоянное напряжение. После пролета через конденсатор сгустка из него удаляется заряженная

компонента и образуется, таким образом, поток нейтральных частиц газа или металла электродов, в зависимости от режима работы плазменной пушки. Удаление заряженной компоненты может производиться и системой сеток, находящихся под соответствующими потенциалами, через которые проходит сгусток. Диафрагмируя поток нейтральных частиц, можно получить требуемую его конфигурацию для загрузки сжатого электронного кольца.

Общий вид плазменной пушки и измерительной камеры показан на рис. 2. Электроды пушки медные. Нами использовались сменные наконечники центрального электрода из вольфрама для газового режима работы пушки, из свинца, индия, меди для режима вакуумного разряда с эрозией. Диаметр центрального электрода в месте расположения отверстий для выхода газа составляет 5,5 см, диаметр сменного наконечника - 1,5 см /при длине 2,5 см/. Диаметр внешнего электрода - 12 см. Использовались также внешние расходящиеся электроды с углом расходимости $\alpha = 7^\circ, 15^\circ$ /см. рис. 2/. Между основными электродами помещались через изолятор поджигающие электроды /иглы/ из вольфрама, причем положение конца поджигающего электрода может изменяться относительно основных электродов. Длина внешнего электрода - 20 см, внутреннего - 18 см. Плазменная пушка вакуумно плотно соединяется с измерительной камерой из нержавеющей стали длиной 80 см, диаметром 32 см. Система откачивалась вакуумным агрегатом ВА-0,5. Вакуум в системе был не хуже $1 \cdot 10^{-5}$ Тор. В измерительной камере имелись крепления для конденсатора, диафрагм, сеток. На боковой поверхности расположены уплотненные по вакууму электрические вводы, два окна с кварцевыми стеклами на расстоянии 40 см друг от друга, откачной патрубков. Через торцевой фланец в камеру вводится координатник, на который крепятся различные датчики /например, многосеточный зонд, цилиндр Фарадея, ионизационный датчик МИ-10 для измерения характеристик потока нейтральных частиц и т.д./ и система крепления которого позволяет ему перемещаться вдоль оси камеры в радиальном и азимутальном направлениях.

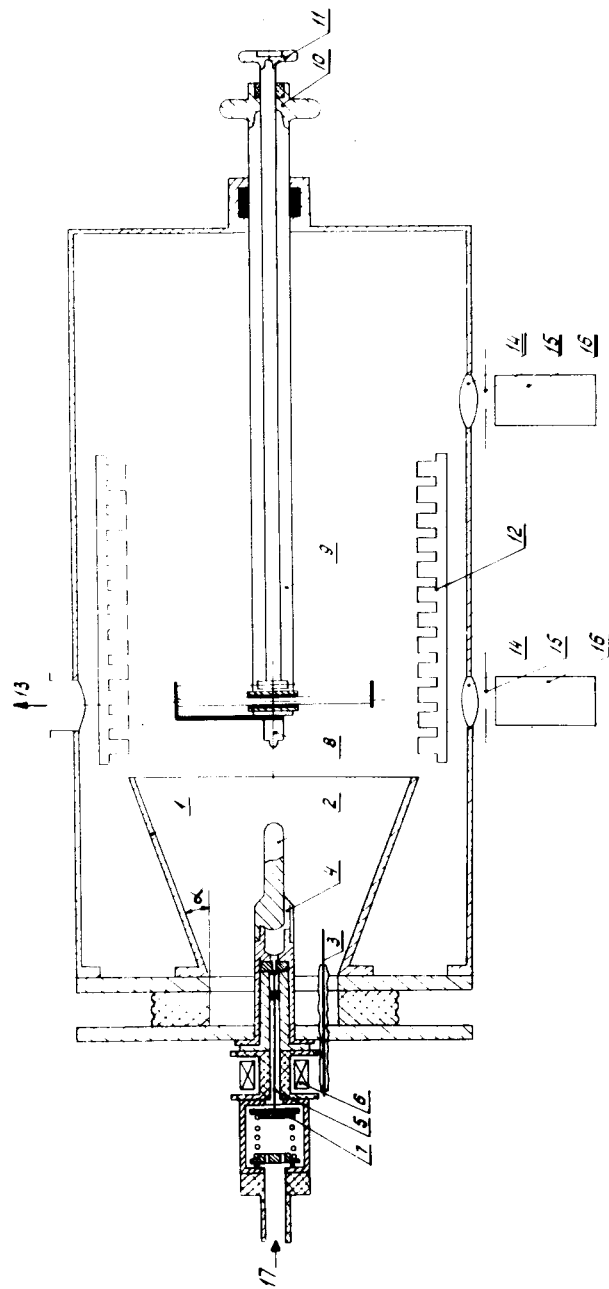


Рис. 2. Общий вид плазменной пушки и измерительной камеры. 1 - внешний электрод; 2 - внутренний электрод; 3 - поджигающие электроды (3 штуки); 4 - отверстие для выхода газа; 5 - шток клапана; 6 - катушка клапана; 7 - диск клапана; 8 - датчик (например, МИ-10); 9 - труба; 10 - лимб перемещения по углу и длине; 11 - лимб перемещения по радиусу; 12 - крепления для диафрагм; 13 - откатка камеры; 14 - окна (кварц); 15 - диафрагмы; 16 - ФЭУ; 17 - отверстие для напуска газа в клапан.

**Методика измерения параметров компонент
плазменных сгустков и результаты экспериментов**

Эксперименты проводились при значении емкости в цепи основного разряда 2 мкФ, напряжении на ней до 10 кВ, током до 12 кА. Длительность полупериода разрядного тока = 7 мкс, число полупериодов - 7. На поджигающие электроды подавались импульсы до 60 кВ, длительностью 2 мкс. Перед работой плазменной пушки в режиме газового разряда с помощью датчика МИ-10 /подробно о нем в^{13/} / настраивался электродинамический клапан таким образом, чтобы межэлектродный объем заполнялся рабочим газом /воздух, ксенон/ в достаточном для создания разряда количестве и за наименьшее время. Скорость заполнения оказалась близкой к предельной скорости истечения газа в вакуум /для воздуха $7,8 \cdot 10^4$ см/с/, для ксенона $3 \cdot 10^4$ см/с/. Как и следовало ожидать, ток разряда увеличивается с увеличением напряжения на емкости разряда. С помощью двух ФЭУ, присоединенных к окнам измерительной камеры, по задержке сигнала во времени, можно было судить о величине направленной продольной скорости плазменного сгустка. На рис. 3 показаны значения определенных таким образом скоростей плазмы для различных напряжений на емкости основного разряда и различных углов расходимости α у внешнего электрода. Из графика видно, что скорость плазменного сгустка почти линейно зависит от величины напряжения на емкости и возрастает с увеличением угла α /при фиксированном значении напряжения/. На рис. 4 показано изменение скорости в зависимости от количества газа в пушке. Видно, что увеличение объема напускаемого газа приводит к снижению скорости сгустка / $U_{к.л.}$ - напряжение на емкости $C_{к.л.}$, которая разряжается через катушку клапана; с увеличением $U_{к.л.}$ количество напускаемого газа увеличивается/. Скорость истечения плазмы уменьшается с увеличением массы атомов выбранного газа /рис. 5/. Аналогичные результаты по изменению скорости заряженных компонент плазменного сгустка в зависимости от перечисленных параметров были получены

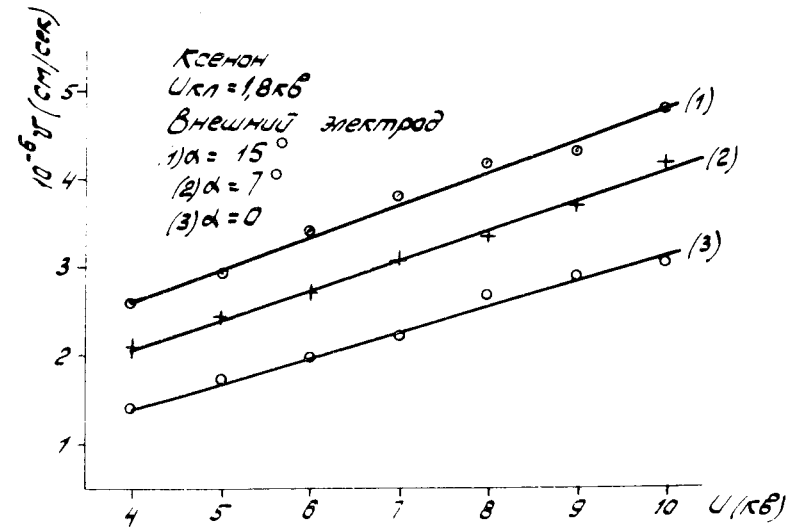


Рис. 3. Зависимость скорости плазмы от различных напряжений на емкости основного разряда и углов расходимости внешнего электрода.

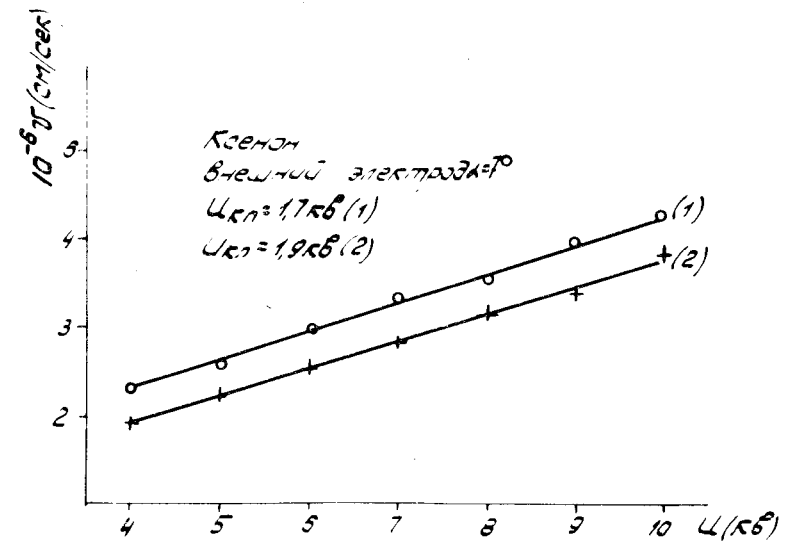


Рис. 4. Зависимость скорости плазмы от количества поступающего в пушку газа.

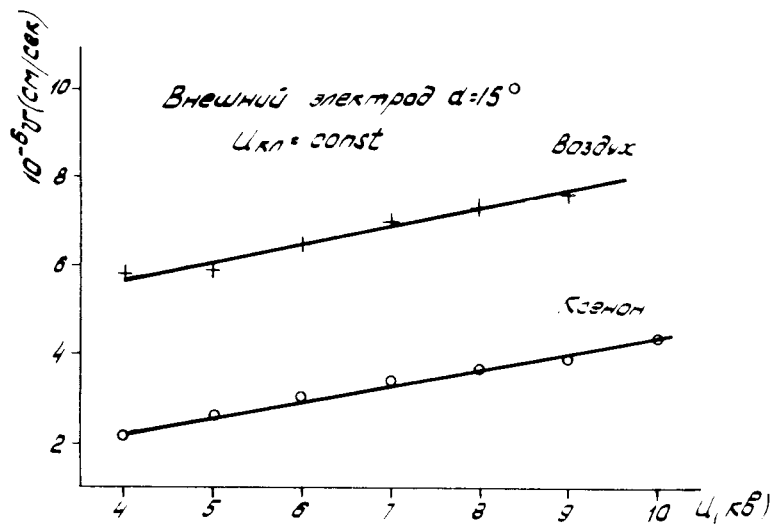


Рис. 5. Зависимость скорости плазмы от рода напускаемого в пушку газа.

с помощью цилиндра Фарадея, который фиксировался на различных расстояниях от пушки. Все эти измерения проводились с первым сгустком, однако пушка генерировала еще 1-2 сгустка меньшей интенсивности. Поток ускоренных нейтральных частиц ксенона фиксировался с помощью датчика МИ-10, на расстоянии 50 см от пушки, при этом между пушкой и датчиком располагалась диафрагма с отверстием $\phi 3$ мм /для понижения плотности плазмы/, система сеток /обычно 2÷3/ с различными потенциалами. Понижение плотности плазмы было необходимо для отделения заряженной компоненты. Таким образом был зарегистрирован ускоренный поток нейтральных частиц ксенона со скоростями от $5 \cdot 10^5$ см/с до тепловой скорости ксенона, равной $2,5 \cdot 10^4$ см/с. Большой разброс по скоростям, по-видимому, связан с большим количеством газа в пушке, а также с наличием нескольких плазменных сгустков, выходящих из нее. Предварительные результаты работы пушки в режиме аperiodического разряда или в режиме разряда с одним полупериодом /с подачей импульса

напряжения на электроды через коммутатор/ показывают возможность создания одного плазменного сгустка и улучшения параметров ускоренного потока газа.

При работе плазменной пушки в режиме вакуумного разряда с эрозией материала электрода /напуск газа не производился/ применялся наконечник центрального электрода из свинца, а внешний электрод - прямой /угол $\alpha = 0^\circ$ /. Для определения скорости атомов свинца использовался спектральный метод /рис. 6/. Два зеркала и призма передают световой сигнал от движущейся плазмы на входную щель спектрографа. Измеряя временной сдвиг, соответствующий появлению атомной линии исследуемого элемента /например, атомная линия Pb 2833 Å /, можем оценить скорость этих атомов. Такой метод измерения дает значение примерно $1 \div 3 \cdot 10^5$ см/с. Общее количество нейтральных частиц свинца определялось из анализа напыленного слоя на органическую пленку или алюминиевую фольгу /перед напылением заряженная

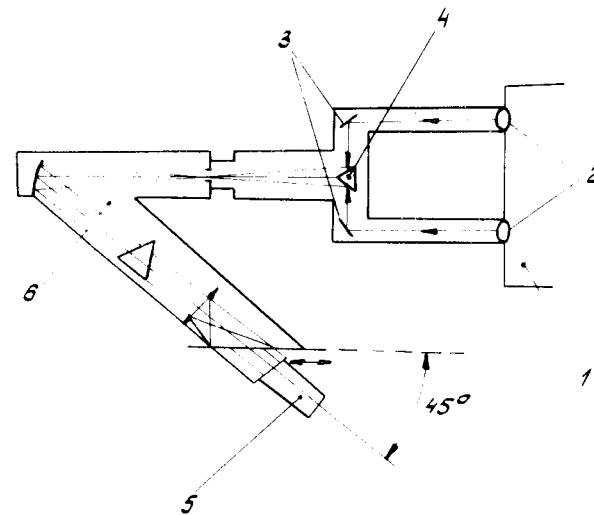


Рис. 6. Схема спектрального метода измерения скорости компонент плазмы. 1 - измерительная камера; 2 - кварцевые окна; 3 - зеркало; 4 - призма; 5 - ФЭУ; 6 - спектрограф.

компонента удалялась из плазмы/. Эти данные были получены регистрацией возбуждаемого источником ^{109}Cd излучения от напыленного слоя свинца /использовался рентгеновский спектрометр, описанный в /14//. Спектр эталона свинца плотностью 20 мкг/см^2 показан на рис. 7а, спектр эталона меди - на рис. 7б, на рис. 7в - спектр напыленного слоя. Слой был напылен за $1,5 \cdot 10^4$ импульсов срабатываний плазменной пушки на расстоянии 20 см от нее. Среднее число нейтральных частиц свинца в потоке за одно срабатывание пушки составляет $\sim 5 \cdot 10^{11} \text{ част/см}^2$. Сменой наконечника были получены потоки нейтральных частиц индия и меди. Плотность напыленного слоя достигала максимума на оси и спадала с расстоянием от нее. Плотность спадала также с увеличением расстояния между пушкой и подложкой, на которую напылялся слой металла.

Заключение

С помощью коллективного метода возможно ускорение любых ядер различных элементов вплоть до самых тяжелых. В связи с этим проблема создания источников нейтральных частиц различных элементов, включая уран, имеет важное значение. Предварительные результаты исследований работы плазменной пушки показывают перспективность ее использования в качестве источника нейтральных частиц. Как видно, плазменная пушка является удобным управляемым прибором, подбирая электрический режим работы и геометрию которого, можно получать ступки нейтральных частиц с оптимальными параметрами для загрузки электронного кольца. Общая предполагаемая компоновка плазменного источника нейтральных частиц с адгезатором УТИ показана на рис. 8. В дальнейшем будет проведено детальное исследование источника и, в конечном счете, потоков атомов различных элементов вплоть до урана.

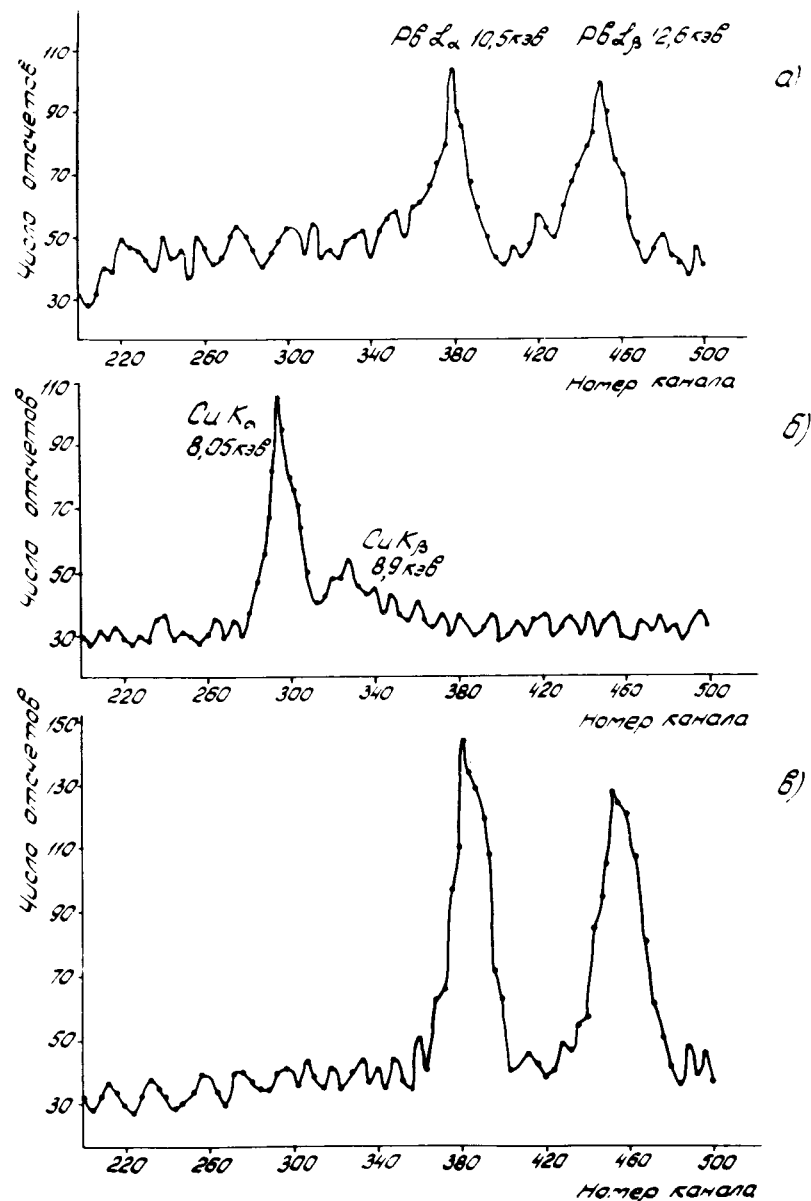


Рис. 7. Спектр эталона свинца плотностью 20 мкг/см^2 /а/ /время экспозиции 15 мин, спектр эталона меди /б/ и спектр напыленного пушкой слоя /в/ /время экспозиции - 30 мин/.

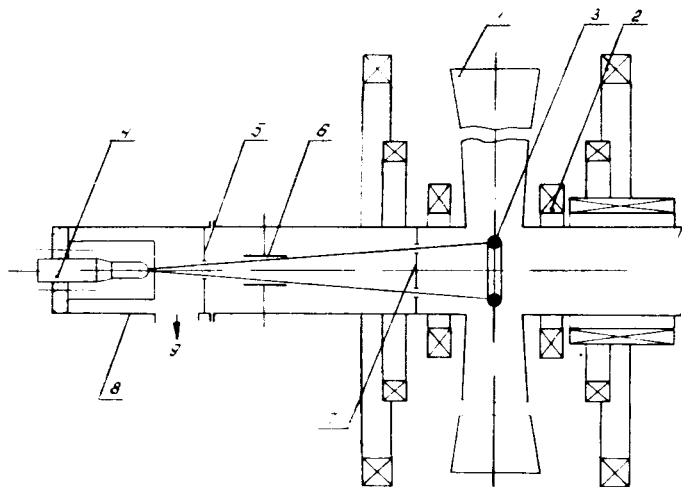


Рис. 8. Общий вид плазменного источника нейтральных частиц и адгезатора УТИ. 1 - камера адгезатора; 2 - катушки, создающие магнитное поле адгезатора; 3 - сжатое электронное кольцо; 4 - плазменная пушка; 5 - ограничительная диафрагма; 6 - разделительный конденсатор; 7 - формирующая диафрагма; 8 - камера пушки; 9 - откачка камеры пушки.

Литература

1. В.П.Саранцев и др. Препринт ОИЯИ, Р9-5558, Дубна, 1971.
2. H.Krauth. "Molecular Beam Apparatus for Defined Loading of the of the Electron Ring"; The Work Meeting on Electron Ring Accelerator, 3d, Karlsruhe, 1969.
3. Л.С.Барабаш и др. Сообщение ОИЯИ, Р9-7697, Дубна, 1974.
4. В.Георге и др. Сообщение ОИЯИ, Р9-6555, Дубна, 1972.
5. М.Л.Иовнович и др. Сообщение ОИЯИ, Р9-8119, Дубна, 1974.
6. И.С.Боровков и др. "Импульсный газодинамический источник молекулярного пучка для коллективного ускорителя тяжелых ионов", IV Всесоюзная конференция по динамике разреженного газа. Москва, 1975, стр.113.

7. П.М.Колесников. "Электродинамическое ускорение плазмы", Атомиздат, 1971.
8. D.C.Hagerman, T.E.Osher. Rev. Sc. Inst., Vol. 34, No1, p.56,1963.
9. П.М.Колесников. ЖТФ, т. 36, в. 1 /1966/.
10. К.Б.Карташев, В.И.Пустунович и др. ЖЭТФ, т. 59, вып. 3/9/, 779 /1970/; АЭ, т. 31, вып. 2, 1651 /1971/.
11. W.L.Barr. UCRL-73228, Preprint, 1971.
12. "Плазменные ускорители", сборник, "Машиностроение", 1973.
13. Е.А.Пенчко. ПТЭ, №1, 170 /1961/.
14. В.Г.Субботин и др. Препринт ОИЯИ, 13-7963, Дубна, 1974.

Рукопись поступила в издательский отдел
28 июля 1976 года.