

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

2695/2-81

1/6-81

P9-81-139

В.Б.Кутнер

ИСТОЧНИКИ ВЫСОКОЗАРЯДНЫХ
И ИНТЕНСИВНЫХ ПУЧКОВ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

1981

Тенденция к исследованиям с использованием ускоренных тяжелых ионов с каждым годом все возрастает¹⁻³. Однако прогресс в этой области существенно зависит как от создания новых ускорителей, так и от возможностей получения многозарядных ионов и ядер легких и тяжелых элементов.

В последнее время появились два уникальных ускорителя тяжелых ионов UNILAC в 1975 году /GSI, Дармштадт/ и У-400 в 1978 году /ОИЯИ, Дубна/. В СССР и ряде стран Запада также разрабатываются и осуществляются разнообразные проекты ускорительных комплексов тяжелых ионов.

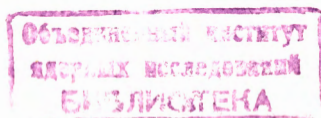
Следует отметить, что проблема ускорения ионов и ядер на ускорителях и ускорительных комплексах тяжелых ионов, как действующих, так вновь разрабатываемых, связана с развитием источников многозарядных ионов и ядер.

Существенное развитие дуоплазмотрона^{4,5} как источника многозарядных ионов позволяет применять его на линейном ускорителе тяжелых ионов - ПИИЛАС.

Получение интенсивных пучков ионов элементов средних масс из дугового источника с катодным распылением рабочего вещества^{6,7} и высокозарядных ионов ксенона вплоть до Xe^{15+} из газоразрядного источника⁸ явилось необходимым для изохронного циклотрона У-400.

Если в обзоре⁹ в 1970 году было отмечено, что для целей ускорения многозарядных ионов используются только источники дугового типа, то в последние годы имеются существенные достижения в развитии лазерного и электронно-лучевого ионных источников. В январе 1976 года впервые в мире было осуществлено ускорение до энергий 50 ГэВ на синхрофазотроне ОИЯИ ядер углерода, полученных из лазерного инжектора¹⁰. В 1977 году для ускорения на синхрофазотроне ОИЯИ ядер углерода, азота, кислорода и неона был использован электронно-лучевой источник "Крион-1"¹¹. Применение этих источников ядер на синхрофазотроне способствовало развитию нового направления в физике тяжелых ионов - релятивистской ядерной физики.

Что касается развития электронно-циклотронно-резонансного (ЕСР) источника многозарядных ионов, то если в 1977 году он еще только рассматривался в качестве инжектора для ускорителей¹², то уже с 1979 года начато сооружение его вариантов для бельгийского циклотрона¹³ и циклотрона в Карлсруе¹⁴.



70-е годы характеризуются существенным развитием источников многозарядных тяжелых ионов, что отражают ранее опубликованные обзоры^{19,15-21,7,22,23/}.

Однако и со времени последних обзоров в развитии ионных источников и получении многозарядных ионов появились новые результаты, которые открывают перспективы исследований с интенсивными пучками тяжелых ионов.

В настоящей работе кратко рассматриваются циклотронный плазменно-дуговой источник (PIG), дуоплазмотрон (DP), лазерный источник (ИМЗИЛ), электронно-лучевой ионный источник (EBIS) и электронно-циклотронно-резонансный источник (ECR) с точки зрения получения высокозарядных и интенсивных пучков, а также сравниваются средние ионные токи, полученные из этих источников для элементов в области кальция и ксенона.

ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОЙ ИСТОЧНИК

Схематическая конструкция источника ионов циклотрона У-400^{16/} представлена на рис. 1. Источник работает в магнитном поле циклотрона. Катод 2, подогреваемый электронным потоком с нити 1, эмиттирует электроны, которые осциллируют между катодом и охлаждаемым антикатодом 8, находящимся под потенциалом катода. Электронный поток ионизирует газ, поступающий через канал 11, в результате чего возникает дуговой разряд. Таков принцип действия газоразрядного источника многозарядных ионов.

Для получения многозарядных ионов из твердых соединений для циклотронов ОИЯИ на основе источника ИАЗ^{24/} были разработаны источники ионов^{25/}, в которых ионизируемое вещество подается в разряд в виде паров из специального тигля или методом катодного распыления электрода 5 из распыляемого рабочего вещества, закрепленного на охлаждаемом медном держателе и находящегося под отрицательным потенциалом. Под действием бомбардировки ускоренными ионами плазмы электрод распыляется. Выбитые частицы попадают в разряд и ионизируются.

В настоящее время в циклотронных источниках с косвенным нагревом катода за счет применения катодов из тантала и отработки режимов удалось получить из источника ток ионов Xe^{15+} до 10 мкА в импульсе^{26/}, при этом в несколько раз /например, на У-300 для ионов Fe^{9+} - на порядок^{18/} /увеличена интенсивность ускоренных пучков на циклотронах ОИЯИ.

На ускорителях Super-NILAC^{27/} и UNILAC^{28/} используются плазменно-дуговые источники с холодными катодами. В источниках такого типа получены ионы тринадцатикратной зарядности - Xe^{13+} ^{29/}.

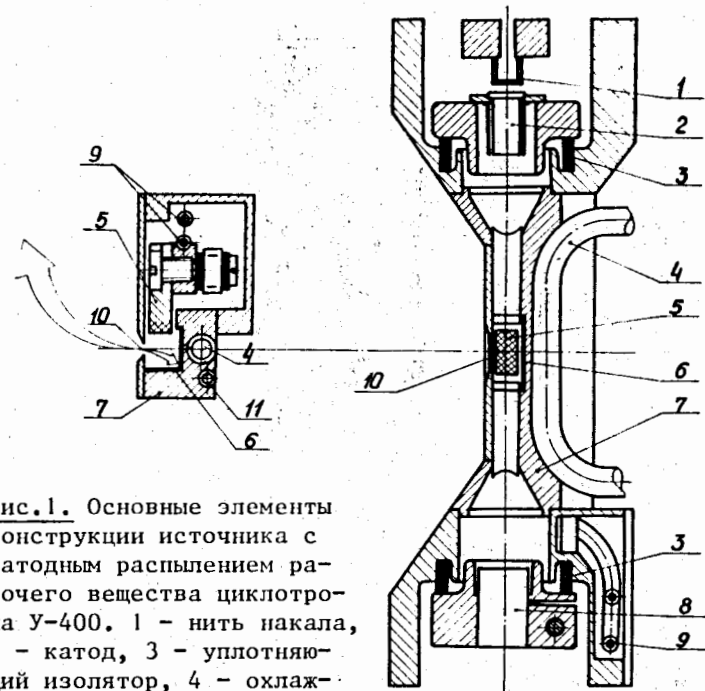


Рис.1. Основные элементы конструкции источника с катодным распылением рабочего вещества циклотрона У-400. 1 - нить накала, 2 - катод, 3 - уплотняющий изолятор, 4 - охлаждающие разрядной камеры, 5 - распыляемый электрод, 6 - сборник распыляемого вещества, 7 - разрядная камера, 8 - антикатод, 9 - охлаждение распыляемого электрода, 10 - эмиссионная щель, 11 - подвод газа.

ДУОПЛАЗМОТРОН

Принцип работы и варианты дуоплазматрона могут быть поняты с помощью рис. 2^{5/} и рис. 3^{30/}. Дуоплазмотрон как высокозарядный ионный источник был развит и исследован в Дармштадте /ФРГ/.

В дуоплазмотронном ионном источнике ионизация рабочего вещества происходит в результате газового разряда, имеющего дуговой характер^{31/}. Разрядный столб зажигается между катодом и анодом сквозь канал промежуточного электрода. В зазоре между анодом и промежуточным электродом за счет сильно неоднородного радиально-симметричного магнитного поля, создаваемого наконечниками электродов, создается плотная анодная плазма, обладающая повышенной по сравнению с катодной плазмой температурой вторичных электронов.

В разработанном для UNILAC дуоплазмотроне Келлер и Мюллер^{4/} за счет создания максимального магнитного поля в облас-

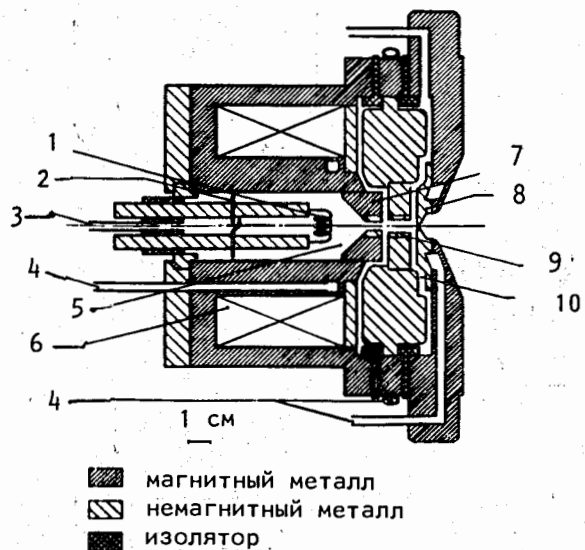


Рис.2. Дуоплазматрон с катодным распылением рабочего вещества. 1 - катод, 2 - экран, 3 - газ, 4 - вода, 5 - катодная камера, 6 - соленоид, 7 - промежуточный электрод, 8 - анод, 9 - распыляемый электрод, 10 - анодная камера.

ти эмиссионного отверстия и повышения анодного напряжения достигли 11-кратной зарядности пучков ионов ксенона.

ЛАЗЕРНЫЙ ИСТОЧНИК МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

Вариант схемы лазерного источника многозарядных ионов для циклотрона^{/32/} представлен на рис. 4.

В результате взаимодействия сфокусированного лазерного излучения 6 с поверхностью мишени 10 образуется плазменный сгусток /факел/ с высокой температурой и плотностью, поглощающий основную часть световой энергии. Факел движется поперек магнитного поля и извлекается через эмиссионную щель в корпусе 11 лазерного источника ионов.

Характеристика лазерного источника ионов, а также возможности его использования для циклотронов, синхрофазотрона и линейных ускорителей подробно рассмотрена в работе^{/33/}. Экспериментальное исследование^{/34/} ионизационного состояния продуктов разлета плазмы, созданной при взаимодействии излучения CO_2 -

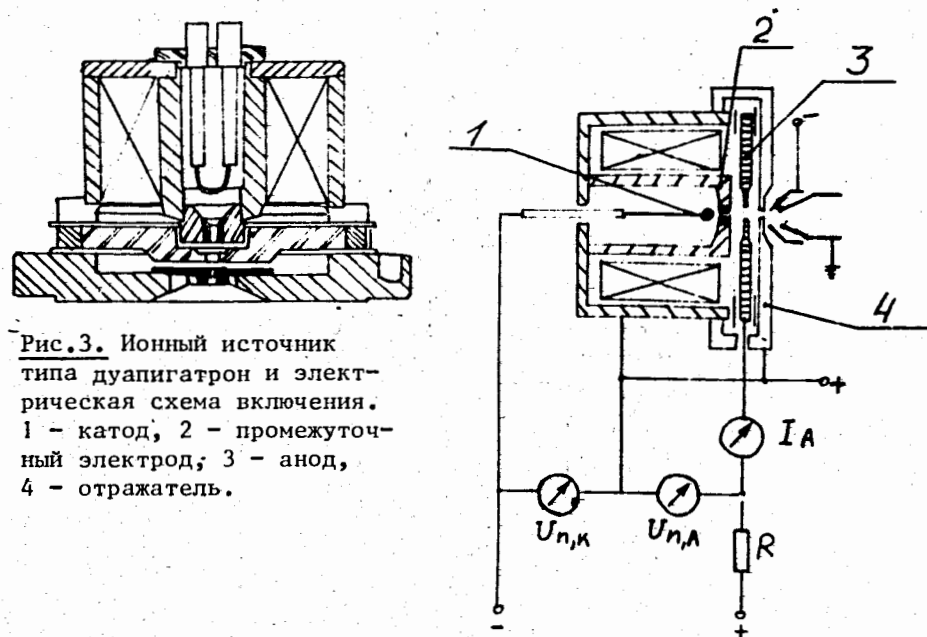


Рис.3. Ионный источник типа дуапигатрон и электрическая схема включения. 1 - катод, 2 - промежуточный электрод; 3 - анод, 4 - отражатель.

лазера с различными мишенями в отсутствие магнитного поля позволило оценить то, что полное число ядер углерода, эмиттируемых в полусферу за лазерный импульс, составляет $\approx 5 \cdot 10^{13}$. Для ионов Al^{11+} и W^{12+} соответствующие количества равны 10^{12} и $3 \cdot 10^9$.

В работе^{/32/} использовался CO_2 -лазер с выходной энергией 4 Дж, позволяющий получить на поверхности мишени плотность лазерного излучения мощностью до $4 \cdot 10^9$ Вт/см². При этом под углом 11° к нормали к поверхности мишени образовался плазменный факел, имеющий вид лепестка с углом раствора перпендикулярно магнитному полю до 10° .

Полное количество ионов C^{6+} , получаемых за один импульс лазера, составляет не менее 10^{10} из эмиссионной щели $5 \cdot 10^{-2}$ мм при наличии ослабляющих сеток, снижающих выход ионов из источника на два порядка.

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ИОННЫЙ ИСТОЧНИК

В 1968 году в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ Е.Д.Донцом, В.И.Илющенко и В.А.Альпертом для исследования процессов ионизации положительных ионов электронным ударом и получения пучков многозарядных ионов был разработан прототип сверхвысоковакуумного электронно-лучевого источника ионов^{/35/} высокой зарядности.

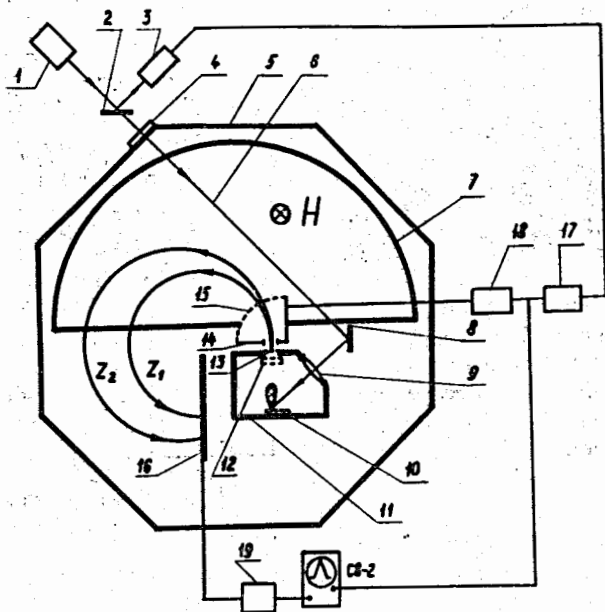


Рис. 4. Схема экспериментальной установки с лазерным источником ионов для циклотрона. 1 - лазер, 2 - светоделительная пластина, 3 - фотозлемент, 4 - окно в камере, 5 - камера стенда источников, 6 - лазерный луч, 7 - дуант, 8 - зеркало, 9 - линза, 10 - мишень, 11 - корпус источника, 12 - ослабляющие сетки, 13 - сепарирующая сетка, 14 - высоковольтный электрод, 15 - экранирующая сетка, 16 - коллектор, 17 - блок временной задержки, 18 - блок высоковольтных импульсов, 19 - усилитель.

В настоящее время на синхрофазотроне ОИЯИ используется криогенный вариант этого источника^{11/}. Принцип действия современного криогенного ионизатора "Крион-2"^{36,37/} аналогичен ранее разработанным источникам этого типа^{38,39/}.

На рис. 5а представлена схема внутренней части источника "Крион-2" и масс-спектрометра по времени пролета.

Электронный пучок высокой плотности создается электронной пушкой 1. Проходя систему трубок дрейфа 2 в поле фокусирующего соленоида, он регистрируется электронным коллектором 3. В области электронного пучка происходит ионизация остаточного газа или рабочего вещества, специально подаваемого в пучок в виде паров или низкозарядных ионов.

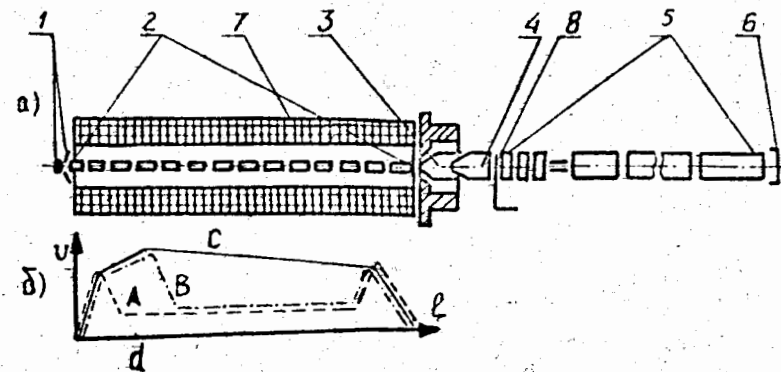


Рис. 5. а/ Схема внутренней части источника "Крион-2" и масс-спектрометра по времени пролета, б/ схема распределения потенциалов вдоль оси электронного пучка, точка d - место ввода рабочего вещества.

Управление процессом ввода ионов, их удержанием и движением в аксиальном направлении осуществляется при помощи трех различных распределений электрического потенциала вдоль оси электронного пучка, которые задаются внешними источниками питания, соединенными с секциями трубки дрейфа /рис. 5б/. Распределение А соответствует вводу; электростатическая ловушка создается практически на всей длине электронного пучка, включая место его прохождения через область газа рабочего элемента. Распределение В соответствует ионизации: место ввода ионов отсечено потенциальным барьером от электростатической ловушки, содержащей ионы исследуемого элемента. Распределение С соответствует экстракции ионов: все ионы из ловушки покидают ее в направлении выхода из источника и попадают в систему анализа, состоящую из вытягивающего электрода 4, элементов масс-спектрометра 5 с ионным коллектором 6, неподвижно закрепленным на оси фокусирующего соленоида 7, а также дополнительным подвижным ионным коллектором 8 на входе в масс-спектрометр.

Для получения сверхнизких давлений $\leq 10^{-12}$ Торр/ и однородного магнитного поля с высоким значением индукции $B = 2,25$ Т/ используются криогенные системы.

Обеспечение шестикратной магнитной компрессии электронного пучка, а также увеличение его энергии до $18 \div 22$ кэВ позволили достигнуть фактора ионизации /произведение плотности потока электронов на время взаимодействия с ионами/ $3.1 \cdot 10^{21}$ см⁻² и выполнить эксперименты по ионизации природной смеси изотопов ксенона. При этом впервые в ионном источнике^{40/} ионизована L-оболочка ксенона и получен пучок ионов Хе⁴⁸⁺. Ранее^{41/} в этом источнике были получены ядра аргона.

Во Франции /Орсэ/ на EBIS SILFES II J. Arianer и Ch. Goldstein^{/42/} получили пучки Kr^{34+} и Xe^{44+} с интенсивностью соответственно $2 \cdot 10^8$ и $3 \cdot 10^7$ част. за импульс.

Причем авторы, анализируя спектр ионов ксенона, утверждают, что Xe^{13+} образуется уже за время пролета ионов вдоль оси источника. Это позволяет им сделать вывод о том, что работа в непрерывном режиме могла бы обеспечить выход ионов с Z/A в области $0,1 \div 0,15$ в количестве $10^{15} \div 10^{16}$ част. в секунду.

ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННО-РЕЗОНАНСНЫЙ ИСТОЧНИК ВЫСОКОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

На рис. 6а приведены схемы, поясняющие принцип работы многостадийных источников: "Триплмафиоз"^{/43/} и "Супермафиоз"^{/44/}. Первая стадия - это плазменный инжектор, где с помощью электронов, разогретых за счет передачи энергии вынужденных СВЧ-колебаний ($\omega_{свч1}$) на ларморовской электронной частоте ($\omega_{свч1} = \omega_{свч1}$), создается низзарядная плазма при давлении в $10^{-2} \div 10^{-4}$ Торр. / $P_{свч1} < 1$ кВт, $\omega_{свч1} = \omega_{свч1} = 2\pi \cdot 16 \cdot 10^9$ Гц, $B_1 \approx 0,6$ Т/.

Во второй стадии с помощью дифференциальной откачки создается давление $\sim 10^{-7}$ Торр для снижения потерь многозарядных ионов при перезарядке. С помощью шести стержней Иоффе в зеркальной ловушке создается магнитная структура с "минимумом В", куда диффундирует плазма, инжектируемая из первой ступени. Во второй ступени за счет электронно-циклотронного резонанса / $P_{свч2} = 1 \div 5$ кВт, $\omega_{свч2} = \omega_{свч2} = 2\pi \cdot 8 \cdot 10^9$ Гц, $B_2 \sim 0,3$ Т/ энергия электронов плазмы повышается до $1 \div 10$ кэВ. Магнитная ловушка в зоне ионизации плазмы быстрыми электронами увеличивает время взаимодействия электронов с ионами и приводит к более высоким зарядовым состояниям.

В варианте "Триплмафиоз" эмитирующее отверстие находилось на выходе третьей ловушки в зоне возрастания магнитного поля. Однако эксперименты показали, что качество пучка не зависит от величины магнитного поля в месте экстракции, тогда как при вытягивании из области высокой концентрации плазмы /"Супермафиоз В"/ может быть получен большой ионный ток.

Из источников этого типа получены интенсивные пучки ионов: $Ag^{12+} \sim 10^{12}$ ч/с, $Xe^{26+} \sim 4 \cdot 10^{10}$ ч/с.

Однако проблема состояла в том, что источники типа "Супермафиоз" потребляли 3 МВт электрической мощности. Отработка оптимальной конфигурации магнитного поля позволила создать источник "Микромафиоз"^{/45/}, изображенный на рис. 7. Магнитная ловушка обдирочной ступени в этом источнике создается суперпозицией магнитных полей соленоидов и шести постоянных магнитов из $SrCO_5$. В результате этого потребляемая электрическая мощность снижена до 100 кВт. При этом из источника получены

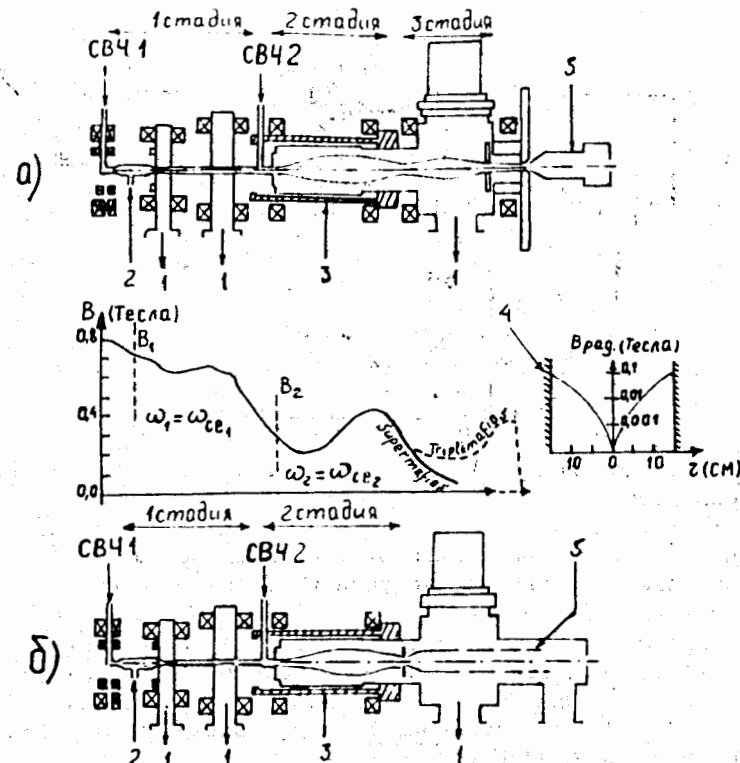


Рис. 6. Схемы многостадийных ECR-источников. 1 - откачка, 2 - напуск газа, 3 - шестиполюсная обмотка, 4 - радиальное распределение поля во второй стадии, 5 - система вытягивающих электродов.

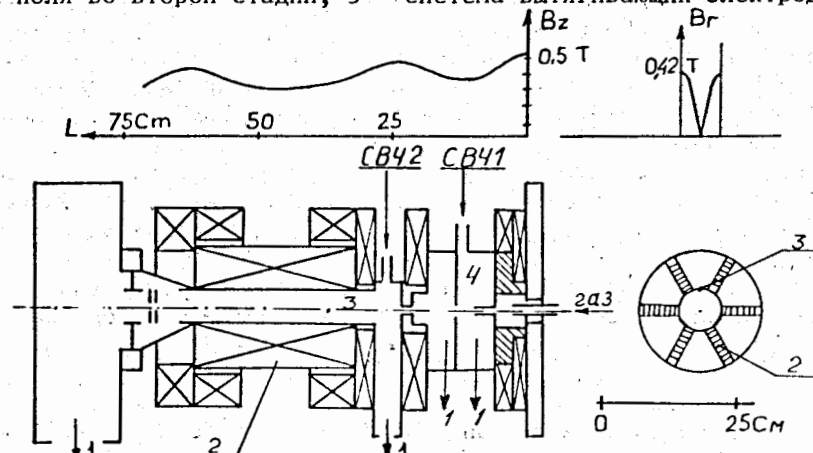


Рис. 7. Общий вид источника "Микромафиоз". 1 - откачка, 2 - стержни Иоффе, 3 - камера второй ступени, 4 - камера первой ступени.

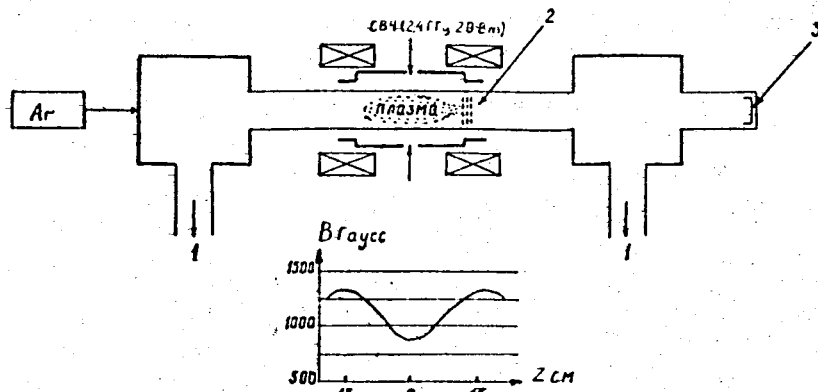


Рис.8. Источник ионов "Гелиос". 1 - откачка, 2 - экстрактор, 3 - коллектор

интенсивные пучки ядер элементов вплоть до неона в количествах, представляющих интерес для ускорения на циклотроне.

Перспективная идея обогащения плазмы многозарядными ионами путем индуцирования в плазме трехмерной электростатической ямы с помощью генерации в плазме кольцевого слоя горячих электронов /источник "Гелиос"/ предложена в работе К.С.Головановского и др.^{46,47/}. На рис. 8 представлена схема, поясняющая работу источника "Гелиос".

Если в центральной части магнитной ловушки возбудить поперечное вращающееся ВЧ-поле с частотой ω и правокруговой поляризацией, то одна из резонансных частот плазмы в этих условиях есть верхняя гибридная частота $\omega^2 = \omega_0^2 + \omega_e^2 / \omega_0$ и ω_e - соответственно плазменная и электронная частоты/, так что резонанс между ВЧ-полем и электронами плазмы приближается к условиям циклотронного резонанса в областях, где ω_0 ниже, т.е. вблизи границы плазмы.

Если выбрать $\omega \approx \omega_e$, то при плотности плазмы на оси, сравнимой с плотностью отсечки, резонанс будет на некоторой аксиально-симметричной кольцевой поверхности, окружающей более плотную плазму.

Нагрев электронов ВЧ-полем наблюдается главным образом в этом горячем кольцевом слое, который поэтому приобретает положительный потенциал по отношению к осевой зоне. Таким образом, условия ЭЦР, выполняемые в кольцевой области, соосной с плазмой, обеспечивают возникновение электростатического барьера в поперечном направлении /или электростатической ямы по сечению плазмы/.

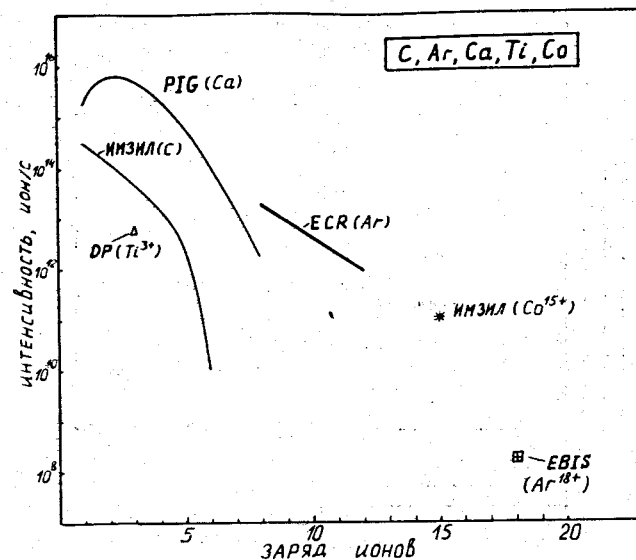


Рис.9. Сравнительные данные средних токов ионов элементов средних масс из различных источников.

Вследствие анизотропии температуры электронов зеркальное магнитное поле индуцирует потенциальный барьер в продольном направлении. Образованная таким образом трехмерная потенциальная яма способствует удержанию ионов по всем направлениям. Время жизни ионов в такого рода электростатической яме экспоненциально растет с увеличением их зарядности и ростом электростатического барьера. Авторы считают, что в источнике "Гелиос" оже-процессы играют существенную роль в накоплении ионов с высоким зарядовым числом.

Вытягивание ионов из электростатической потенциальной ямы осуществляется с помощью трехсеточной системы. Анализ ионной компоненты с применением пролетного масс-спектрометра показывает наличие в сравнимых количествах ионов Ar^+ , Ar^{2+} , Ar^{3+} , Ar^{4+} , Ar^{5+} , Ar^{6+} , а также примесных ионов C^+ , C^{2+} , C^{3+} , H^+ , He^{2+} при полной плотности тока ионов, вытягиваемых из плазмы 20 mA/cm^2 .

Обращают на себя внимание исключительно малые затраты энергии /в описанном варианте около 20 Вт/ на создание высокоионизованных состояний. По последним данным, повышение мощности СВЧ до 100 Вт на длине волны $\lambda = 12,1 \text{ см}$ привело к существенному обогащению плазмы "Гелиос" ионами Ar^{7+} , Ar^{8+} , Ar^{9+} .

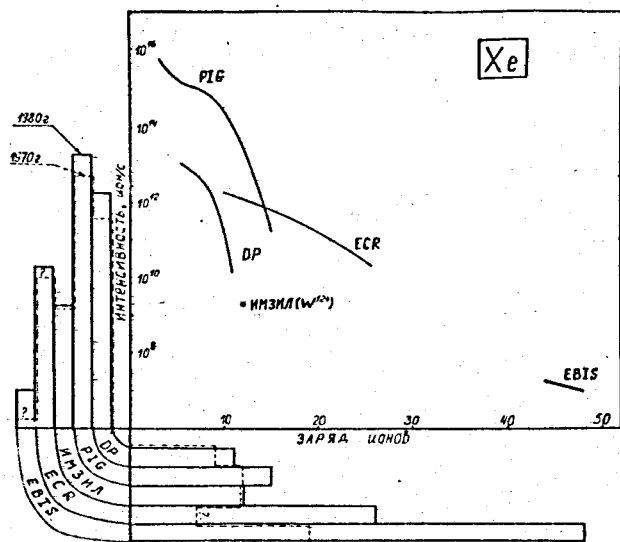


Рис.10. Выход ионов и темп получения интенсивных и высокозарядных пучков ионов ксенона и вольфрама из различных источников.

На рис. 9 и 10 для сравнения приведены данные по интенсивностям и зарядностям ионных пучков из различных источников.

Следует отметить, что в последние годы существенное развитие получили три вида источников многозарядных ионов - EBIS, ECR и ИМЗИЛ. Что касается EBIS, то нынешний уровень разработки электронно-лучевого метода ионизации показывает, что таким методом весьма реально получение интенсивных пучков ядер урана. Возможности увеличения фактора ионизации за счет повышения энергии электронного пучка и получение электронных пучков с большими плотностями / $\geq 10^4$ А/см² / делают его конкурентоспособным по интенсивности с традиционными источниками ионов.

Определенный интерес в последние годы связан с успешным развитием ECR-источника. В работе Х.Кляйна^{148/} приводятся данные по ионизации аргона, указывающие на перспективность этих источников. Что касается лазерного источника ионов, то в настоящее время получены важные результаты, указывающие на возможность отделения ионной компоненты лазерной плазмы в условиях центральной области циклотрона.

Автор благодарен академику Г.Н.Флерову и профессору Ю.Ц.Оганесяну, стимулировавшим проведенный анализ, А.С.Пасюку и Е.Д.Донцу за замечания, профессору К.С.Головановскому и В.Д.Пекленкову, способствовавшим экспрессности материалов,

а также Р.Беккеру и Х.Кляйну /ФРГ/ за дискуссии по ряду вопросов, нашедших отражение в статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. Флеров Г.Н. и др. VII Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 14-16 октября 1980 г. Сборник аннотаций докладов. ОИЯИ, Д9-80-637, Дубна, 1980 г.
2. Оганесян Ю.Ц. ОИЯИ, Р9-12843, Дубна, 1979.
3. Оганесян Ю.Ц., Лазарев Ю.А. Международный симпозиум по синтезу и свойствам новых элементов. Дубна, 23-27 сентября, 1980 г. Сборник аннотаций докладов. ОИЯИ, Д7-80-556, Дубна, 1980.
4. Keller R., Müller M. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1976, NS-23, 2, p. 1049.
5. Keller R., Müller M. GSI-P-33-77, Workshop on EBIS and Related Topics, Darmstadt, June 15-16, 1977, p. 7.
6. Третьяков Ю.П. и др. VII Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 14-16 октября 1980 г. Сборник аннотаций докладов. ОИЯИ, Д9-80-637, Дубна, 1980.
7. Кутнер В.Б., Пасюк А.С., Третьяков Ю.П. ОИЯИ, 9-11281, Дубна, 1978.
8. Пасюк А.С., Кутнер В.Б., Третьяков Ю.П. Proc. of the Seminar on Isochronous Cycl. Tech., Crakow, 13-18 November 1978, p. 432.
9. Воробьев Е.Д., Пасюк А.С. Материалы XIV Всесоюзной конференции по эмиссионной электронике. Ташкент, 1970 г.; ОИЯИ, Р7-5177, Дубна, 1970.
10. Ананьин О.Б. и др. Квантовая электроника, 1977, 4, 7, с. 1547.
11. Вадеев В.П. и др. ОИЯИ, Р7-10823, Дубна, 1977.
12. Briand P., et al. Workshop on EBIS and Related Topics, GSI-P-3-77, Darmstadt 1977, p. 42.
13. Jongen Y. et al. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1979, NS-26, 3, 2, p. 3677.
14. Bechtold V. et al. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1979, NS-26, 3, 2, p. 3680.
15. Bennet J.R. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1971, NS-18, 3, p. 55.
16. Eninger J.E. Nucl. Instr. and Meth., 1971, 97, p. 19.
17. Septier A. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1972, NS-19, 2, p. 22.
18. Winter H., Wolf B.H. Proc. 2nd Symp. on Ion Sources and Formation of Ion Beams, Berkeley, Calif., 22-25 October 1974; LBL-3399, v. 1, 1974, Lawrence Berkeley Laboratory.

19. Arianer J. 7th Intern. Conf. on Cycl. and their Applications, 1975, Zürich, Birkhäuser, p. 341.
20. Clark D.J. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1976, NS-23, 2, p. 1166.
21. Clark D.J. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1977, NS-24, 3, p. 1064.
22. Веников Н.И. Препринт ИАЭ-3217, М., 1979.
23. Герасимов Е.И., Голубев В.П., Никифоров С.А. Обзор ОД-28, НИИЗФА, Л., 1979.
24. Морозов П.М., Маков Б.Н., Иоффе М.Ф. АЭ, 1957, 2, 3, с. 272.
25. Pasyuk A.S., Tretjakov Yu.P. Proc. of the Second Intern. Conf. on Ion Sources. Sept. 11-15, 1972, Vienna, Austria, p. 512.
26. Пасюк А.С., Кутнер В.Б., Третьяков Ю.П. ПТЭ, 1980, 1, с. 41; ОИЯИ, Р9-11914, Дубна, 1978.
27. Gavin B. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1976, NS-23, p. 1008.
28. Schulte H., Jacoby W., Wolf V.H. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1976, NS-23, p. 1042.
29. Schulte J., Illgen J., Wolf V.H. Proc. of the Second Intern. Conf. on Ion Sources. Sept. 11-15, 1972, Vienna, Austria, p. 549.
30. Wolf V.H. GSI-Bericht PB-3-75, Darmstadt, 1975, s.25.
31. Krupp H. GSI-Bericht A1-74 Darmstadt, 1974.
32. Колесов И.В. и др. VII Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 14-16 октября, 1980. Сборник аннотаций докладов. ОИЯИ, Д9-80-637, Дубна, 1980.
33. Ананьин О.Б. и др. ОИЯИ, Р7-7368, Дубна, 1973.
34. Быковский Ю.А. и др. Письма в ЖЭТФ, 1979, 5, 1, с. 46.
35. Донец Е.Д., Илющенко В.И., Альперт В.А. ОИЯИ, Р7-4124, Дубна, 1968.
36. Донец Е.Д., Овсянников В.П. ОИЯИ, Р7-10780, Дубна, 1977.
37. Донец Е.Д., Овсянников В.П. ОИЯИ, Р7-80-515, Дубна, 1980.
38. Donets E.D. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1976, NS-23, No. 2, p. 879.
39. Донец Е.Д., Пикин А.И. ЖТФ, 1975, 45, с. 2373.
40. Донец Е.Д., Овсянников В.П., Дудников В.Г. ОИЯИ, Р7-12905, Дубна, 1979.
41. Донец Е.Д., Овсянников В.П. ОИЯИ, Р7-10438, Дубна, 1977.
42. Arianer J., Goldstein Ch. 1979, IPNO-79-02, Orsay, France.
43. Geller R. IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1976, NS-23, 2, p. 904.
44. Geller R. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1979, NS-26, 2, p. 2120.
45. Dousson S., Geller R., Jacquot B. Second Intern. Conf. on Low Energy Ion Beams (LEIB-2) 14-17 April, Bath, 1980.
46. Dougar-Jabon V.D., Golovanivsky K.S., Schepilov V.D. Phys.Scripta, 1978, 18, p. 506.

47. Головановский К.С., Дугар-Жабон В.Д., Шепилов В.Д. Тезисы докладов V Всесоюзной конференции по физике низкотемпературной плазмы. Киев, 1979, с. 194. Изд. Института электродинамики АН УССР.
48. Klein H. 4th EPS Gen. Conf., 1979, Chapter 6, p. 413.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 февраля 1981 года.