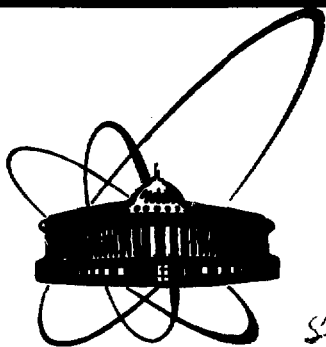


Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.
Заказ 29349. Тираж 400. Уч.-изд. листов 0,74.
Редактор Б.Б.Колесова.
Набор О.В.Мошкиной, Е.М.Граменицкой.
Макет Н.А.Киселевой. Подписано к печати 04.03.81.



✓
СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

508106854

Дубна

Р981-139
↑

В.Б.Кутнер

ИСТОЧНИКИ ВЫСОКОЗАРЯДНЫХ
И ИНТЕНСИВНЫХ ПУЧКОВ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

1981

Источники высокозарядных и интенсивных пучков тяжелых ионов

Рассматриваются циклотронный плазменно-дуговой источник (PIG), дуо-плазмотрон (DP), лазерный источник (ИМЗИЛ), электронно-лучевой ионный источник (EBIS) и электронно-циклотронно-резонансный источник (ECR) с точки зрения получения высокозарядных и интенсивных пучков. Отмечается, что в последние годы существенное развитие получили три вида источников многозарядных ионов - EBIS, ECR и ИМЗИЛ.

В источнике EBIS получены ионы Xe^{48+} . Нынешний уровень разработки электронно-лучевого метода ионизации показывает, что с помощью такого метода становится реальным получение интенсивных пучков ядер урана. Из источника ECR получены интенсивные пучки ионов: $Ar^{12+} \approx 10^{12}$ ч/с, $Xe^{26+} \approx 4 \cdot 10^{10}$ ч/с. В лазерном источнике полное количество ионов C^{6+} за один импульс лазера составляет не менее 10^{10} из эмиссионной щели 5×10 мм². В настоящее время достигнуты важные результаты, указывающие на возможность отделения ионной компоненты лазерной плазмы в условиях центральной области циклотрона. В PIG источнике получен ток ионов Xe^{16+} до 10 мкА в импульсе. В дуоплазмотроне достигнута 11-кратная зарядность пучков ионов ксенона.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1981

Multicharged and Intense Heavy Ion Sources

A review of PIG, duoplasmatron, laser, electron beam (EBIS) and electron cyclotron resonance (ECR) ion sources from the viewpoint of intense and high charge state ion beams is given. From the EBIS source the average charge state of Xe^{48+} is obtained. A recent level of development of the electron beam ionization method shows that it is possible to obtain intense beams of uranium nuclei. The intense ion beam $Ar^{12+} \approx 10^{12}$ pps, $Xe^{26+} \approx 4 \cdot 10^{10}$ pps are obtained from the ECR ion source. The output of C^{6+} from the laser ion source consists of more than 10^{10} pps out of emission slit with 5×10 mm² dimension. At the present time important results pointing to the possibility to separate the ion component of laser plasma in the central region of the cyclotron have been obtained. The PIG source gives Xe^{16+} ions with the 10 mka per pulse intensity. From the duoplasmatron ion source ion beams of xenon with the 11 - charge state are reached. The results obtained with various heavy ion sources are compared.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 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 дуоплазматрона^{4,5} как источника многозарядных ионов позволяет применять его на линейном ускорителе тяжелых ионов - UNILAC.

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 (ECR) 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 /9,15-21,7,22,23/.

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), дуоплазматрон (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 В¹ 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 ИАЗ²⁴ были разработаны источники ионов²⁵, 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 обработки режимов удалось получить из источника ток ионов Хе¹⁵⁺ до 10 мкА в импульсе²⁶, при этом в несколько раз /например, на У-300 для ионов Fe⁹⁺ - на порядок⁸/ увеличена интенсивность ускоренных пучков на циклотронах ОИЯИ.

На ускорителях Super-NILAC²⁷ и UNILAC²⁸ используют плазменно-дуговые источники с холодными катодами. В источниках такого типа получены ионы тринадцатикратной зарядности - Хе¹³⁺²⁹.

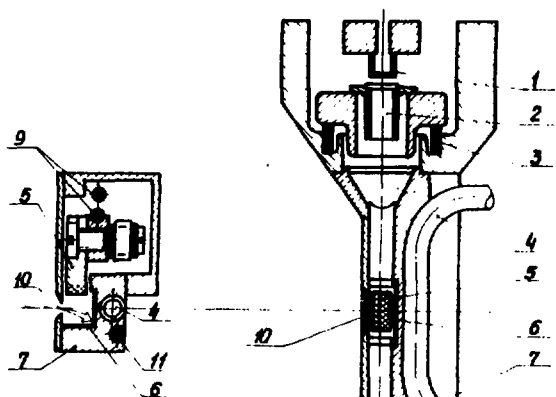


Рис. 1. Основные элементы конструкции источника с катодным распылением рабочего вещества циклотрона У-400. 1 - нить накала, 2 - катод, 3 - уплотняющий изолятор, 4 - охлаждение разрядной камеры, 5 - распыляемый электрод, 6 - сборник распыляемого вещества, 7 - разрядная камера, 8 - антикатод, 9 - охлаждающее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

ДУОПЛАЗМОТРОН

Принцип работы и варианты дуоплазматрона могут быть поняты с помощью рис. 2^{35/} и рис. 3^{30/}. Дуоплазматрон как высокозарядный ионный источник был развит и исследован в Дармштадте /ФРГ/.

В дуоплазматронном 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 дуоплазматроне Келлер и Мюллер^{4/} за счет создания максимального магнитного поля в облас-

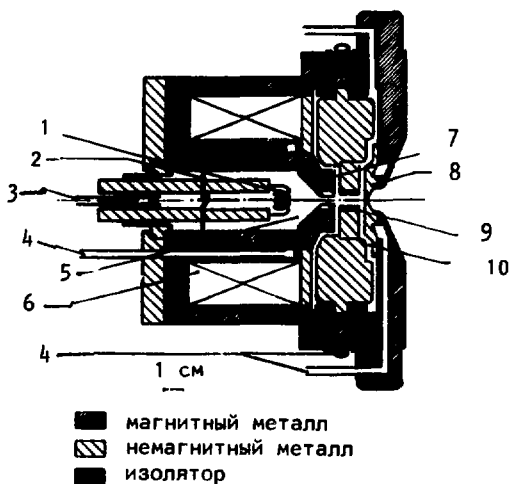


Рис.2. Дуоплазмотрон с катодным распылением рабочего вещества. 1 — катод, 2 — экран, 3 — газ, 4 — вода, 5 — катодная камера, 6 — соленоид, 7 — промежуточный электрод, 8 — анод, 9 — распыляемый электрод, 10 — анодная камера.

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 CO₂-

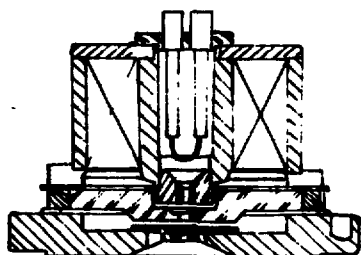
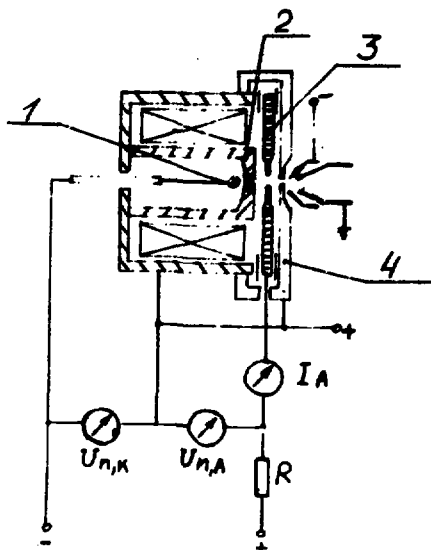


Рис.3. Ионный источник типа дуапигатрон и электрическая схема включения. 1 - катод, 2 - промежуточный электрод, 3 - анод, 4 - отражатель.



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 работе³² 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 ионов³⁵ высокой зарядности.

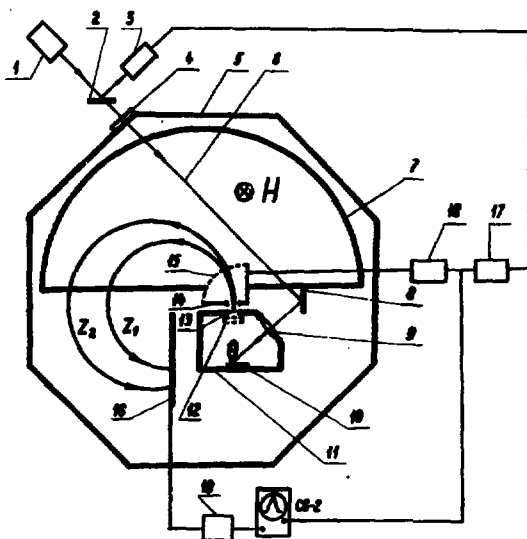


Рис. 4. Схема экспериментальной установки с лазерным источником ионов для циклотрона. 1 - лазер, 2 - светоделительная пластинка, 3 - фотозэлемент, 4 - окно в камере, 5 - камера стенда источников, 6 - лазерный луч, 7 - дуант, 8 - зеркало, 9 - линза, 10 - мишень, 11 - корпус источника, 12 - ослабляющие 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 ¹¹Крион-2^{11/38,37/} аналогичен ранее разработанным источникам этого типа^{/38,39/}.

На рис. 5а представлена схема внутренней части источника ¹¹Крион-2¹¹ 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.

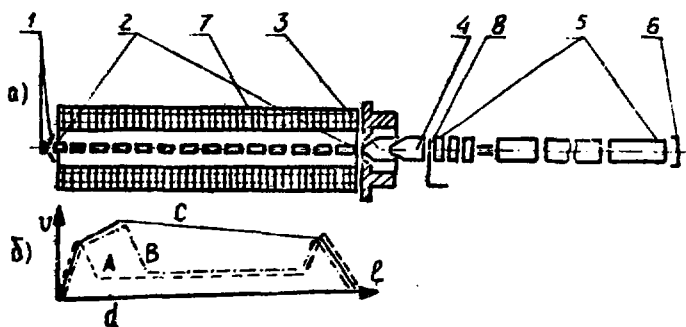


Рис. 5. а/ Схема внутренней части источника "Крион-2" и масс-спектрометра по времени пролета, б/ схема распределения потенциалов вдоль оси электронного пучка, точка d - место ввода рабочего вещества.

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 / $B \approx 2,25$ 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 источнике⁴⁰ ионизована L-оболочка ксенона и получен пучок ионов Xe^{48+} . Ранее⁴¹ в этом источнике были получены ядра аргона.

Во Франции /Орсэ/ на EBIS SILFES II J. Arianer и Ch. Goldstein⁴² 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 ($\omega_{СЕ1}$), создается низкозарядная плазма при давлении в $10^{-2} \div 10^{-4}$ Торр. / $P_{СВЧ1}$: 1 кВт, $\omega_{СВЧ1} = \omega_{СЕ1} = 2\pi \cdot 16 \cdot 10^9$ 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, $\omega_{СВЧ2} = \omega_{СЕ2} = 2\pi \cdot 8 \cdot 10^9$ 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 высокому зарядовым состояниям.

В варианте "Триплмафиоз" эмиттирующее 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: $Ar^{12+} \sim 10^{12}$ 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. Обработка 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 $SmCO_5$. В результате этого потребляемая электрическая мощность снижена до 100 кВт. При этом из источника получены

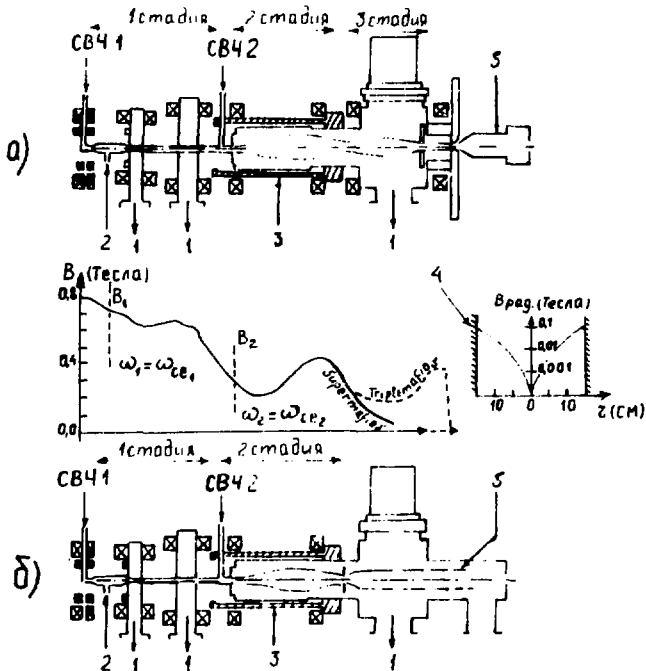


Рис.6. Схемы многостадийных ECR-источников. 1 - откачка, 2 - напуск газа, 3 - шестиполюсная обмотка, 4 - радиальное распределение поля во второй стадии, 5 - система вытягивающих электродов.

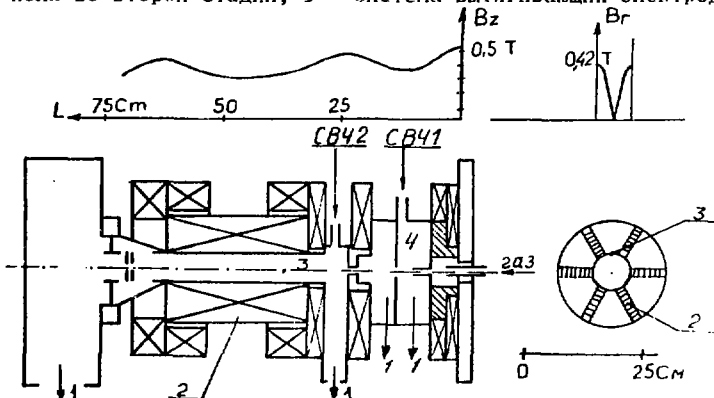


Рис.7. Общий вид источника "Мькромافیоз". 1 - откачка, 2 - стержни Иoffe, 3 - камера второй ступени, 4 - камера первой ступени.

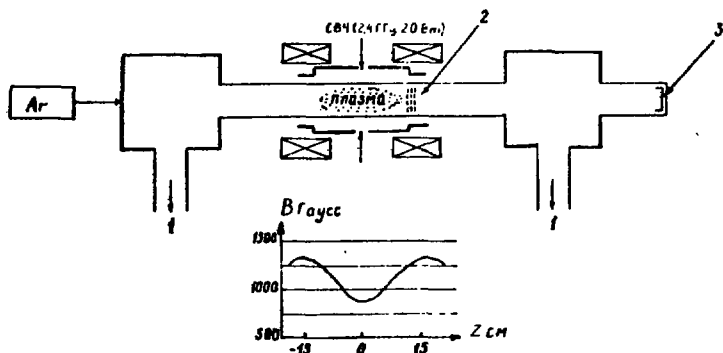


Рис. 8. Источник ионов "Гелиос". 1 - откачка, 2 - экстрактор, 3 - коллектор

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/.

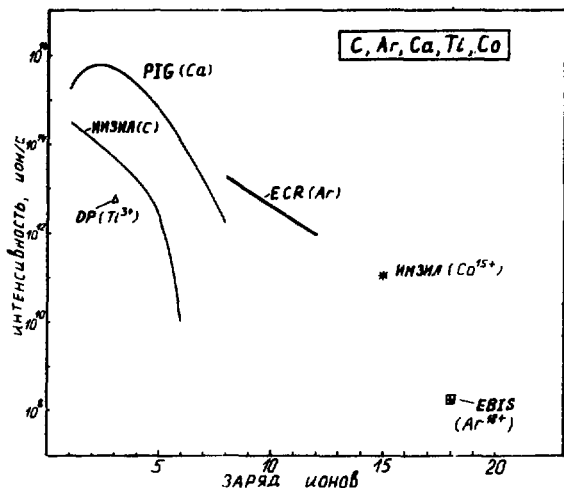


Рис.9. Сравнительные данные средних токов ионов элементов средних масс из различных источников.

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^+ , H^{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+} .

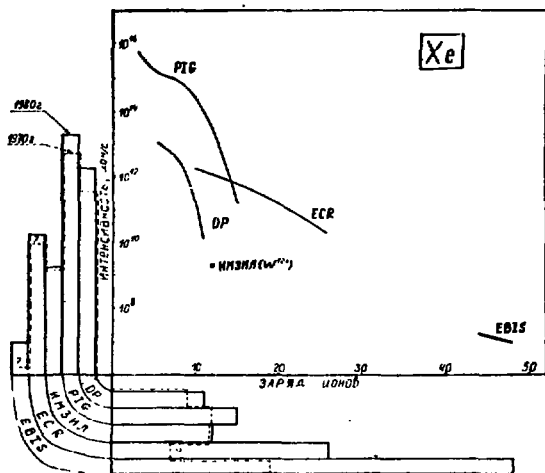


Рис.10. Выход ионов и темп получения интенсивных и высокозарядных пучков ионов ксенона и вольфрама из различных источников.

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 / $\sim 10^4$ 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 ⁴⁸ 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 V.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, Birkhauser, 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 ИАЗ-3217, М., 1979.
23. Герасимов Е.И., Голубев В.П., Никифоров С.А. Обзор ОД-28, НИИЭФА, 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.Г., 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 B.H. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1976, NS-23, p. 1042.
29. Schulte J., Illgen J., Wolf B.H. Proc. of the Second Intern. Conf. on Ion Sources. Sept. 11-15, 1972, Vienna, Austria, p. 549.
30. Wolf B.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.

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники

