

B381.1

B.85

ТРУДЫ
ДЕСЯТОГО ВСЕСОЮЗНОГО
СОВЕЩАНИЯ
ПО УСКОРИТЕЛЯМ
ЗАРЯЖЕННЫХ
ЧАСТИЦ

Том II

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ИСТОЧНИК МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ ИМИ-1

В.Г.Абдульманов, В.Л.Ауслендер, Ю.М.Колокольников,
И.Н.Мешков, В.Г.Потапов, Г.А.Тутин, В.П.Эйсмонт

Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск

В ИЯФ СО АН СССР разработан электронно-лучевой источник многозарядных ионов для ускорительного комплекса синхротрона Б-5, поставленного Радиевому институту им. В.Г.Хлопина /I/.

Синхротрон Б-5 предназначен для ускорения полностью ионизованных атомов с $Z/A \approx 0,5$ до энергий 50 МэВ/нуклон. При этом величина Z ограничена вакуумными условиями и реально не превышает 20 /I-4/.

Источник многозарядных ионов должен обеспечивать достаточно высокий выход ядер до $1 \cdot 10^8 + 5 \cdot 10^8$ /с при частоте повторения циклов ионизации 50 Гц. Из известных конструкций источников многозарядных ионов наиболее приемлемым для поставленной цели является электронно-лучевой источник многозарядных ионов, предложенный Е.Д.Донцом /5-7/, принцип действия которого и был взят за основу. В электронно-лучевых источниках реально получают ядра тяжелых элементов /7-9/.

В отличие от известных источников такого типа, разрабатываемый источник должен был обладать рядом существенно новых характеристик.

1) В источнике необходимо реализовать фактор ионизации $j\tau \sim 10^{20}$ Эл/см² с целью получения ядер аргона Ar^{18+} при длительности цикла ионизации не более 20 мс и частоте повторения 50 Гц, т.е. источник должен работать в квазинепрерывном режиме при плотности электронного пучка порядка 10^3 А/см².

2) Источник должен обеспечивать получение многозарядных ионов и ядер не только газообразных, но и твердых элементов.

3) Однооборотная схема инжекции в синхротрон Б-5 требует производить вывод ионов из ловушки за время порядка 1 мкс.

Первоначальный проект источника /I/ в процессе экспериментальной отработки существенно видоизменялся. Вначале был создан макет источника, на котором в 1977 г. были проведены первые эксперименты по формированию электронного пучка с плотностью до 200 А/см² /10/. На этой установке после запуска всех систем питания и доработки были проведены первые эксперименты по получению многозарядных ионов остаточного газа /II/.

По результатам проведенных экспериментов на этих макетах в 1980-83 гг. в ИЯФ был разработан рабочий вариант электронно-лучевого источника многозарядных ионов ИМИ-1, с новой электронно-оптической системой ЗОС /12/, в котором введена система дозированного импульсного напуска паров твердых элементов, усовершенствованы система напуска газов и конструкции внутреннего распределенного магнито-разрядного насоса, увеличен диаметр вакуумной камеры источника до 160 мм, изменена конструкция системы разводки выводов дрейфовой структуры, значительно усовершенствован соленоид биттеровского типа с автономной системой охлаждения, снабженной фильтрами из ионообменных смол. В рабочем контуре системы охлаждения соленоида сопротивление воды достигает $5 + 10 \cdot 10^6$ Ом/см³. Проведена существенная доработка систем питания источника.

Схема источника ИМИ-1, имеющего вертикальную конструкцию, приведена на рис.1а. ЗОС источника включает в себя частично экранированную сферическую короткофокусную пушку (1). Фокусирующий соленоид (2) биттеровского типа с замкнутым магнитопроводом и полюсами (3-4) создает фокусирующее поле до 0,9Т. Магнитные линзы (5-6) вместе с полюсами обеспечивают оптимальные условия

ввода электронного пучка в рабочую область - дрейфовую структуру (7) и распределение его в электронном коллекторе (8). Подробно конструкция ЭОС и её работа обсуждаются в докладе /12/. Конструкция источника целиком прогретная. Рабочая камера с дрейфовой структурой прогревается излучением внутреннего нагревателя (9), который имеет секторную конструкцию и обеспечивает достаточную проводимость при включенном распределенном внутри камеры магнито-разрядном насосе - МРН (10) и в то же время обеспечивает надежную экранировку дрейфовой структуры от напыления титана при работе насоса. В рабочей камере обеспечиваются условия дифференциальной откачки, т.к. проводимость в области полюсов незначительна. Распределенный МРН (10) обеспечивает скорость откачки около 500 л/с при поле соленоида 0,5 Т. Температура дрейфовой структуры 400°C при прогреве контролируется с помощью термопары ХК. После 60-часового прогрева всего источника и при включенном распределенном МРН без пучка обеспечивается вакуум в рабочей области не хуже $1+2 \cdot 10^{-10}$ Тор, а при работе с пучком $1+2 \cdot 10^{-9}$ Тор, что позволяет доводить время ионизации до 10 мс. Время компенсации объемного заряда пучка в ионной ловушке ионами остаточного газа составляет $15+20$ мс.

Для напуска в ионную ловушку нейтральных атомов соответствующих элементов используются в зависимости от сорта ионов твердотельные мишени (11), вещество которых испаряется при импульсном сбросе на них электронного пучка, или система напуска газа. Напуск газа осуществляется через отверстие в стенке дрейфовой трубки (12).

Диаграмма распределения потенциалов приведена на рис.16. Потенциал В ("дно" ионной ловушки) определяет энергию ионизирующего электронного пучка и энергию выводимых из ловушки ионов. Барьер А выше барьера С, что исключает засорение ионной ловушки примесными ионами из области электронной пушки. Высота барьера А до 1,5 кВ, барьер С около 0,5 кВ. Потенциал В составлял в экспериментах величину $5+10$ кВ. Барьер С включается на нижние секции (рис.16, сплошная линия) при работе с твердотельными элементами и (пунктирная линия) при работе с газами для обеспечения дозированного напуска атомов в ловушку В. Длина ионной ловушки 35 см. Область дрейфа 50 см. Выпуск ионов из ловушки происходит при снижении барьера С до уровня D. Накопленные в ловушке ионы за счет собственного разброса скоростей выходят из ловушки и ускоряются в два этапа на разности потенциалов В-D в стационарном магнитном поле и затем на разности потенциалов между нижним конусом и электронным коллектором. Выпуск ионов осуществляется через отверстие в электронном коллекторе. Диаметр отверстия 10 мм.

В экранированном от рассеянных магнитных полей ионопроводе сразу за электронным коллектором установлена электростатическая линза (13), ниже которой через шибер (на схеме не показан) пристыкован магнитный анализатор (14) с многоламельным ионным коллектором (15), подключенным к многоканальному измерителю параметров пучков ИПИ-32М (16). Прибор ИПИ-32М /13/ был специально доработан для анализа ионного спектра на источнике. Магнитный анализатор обеспечивает анализ спектра зарядностей ионов за одну перестройку поля в диапазоне $Z_{\text{макс}} / Z_{\text{мин}} = 2$.

При выключенном магнитном поле в анализаторе (14) ионный пучок попадает на бериллиевую мишень (17), установленную в ионном коллекторе (18), сигнал с которого можно наблюдать на осциллографе. Через отверстие в стенке коллектора характеристическое излучение попадает на III детектор блока детектирования рентгеновского излучения БДРК-1/25 (19), работа которого была ранее апробирована /14/.

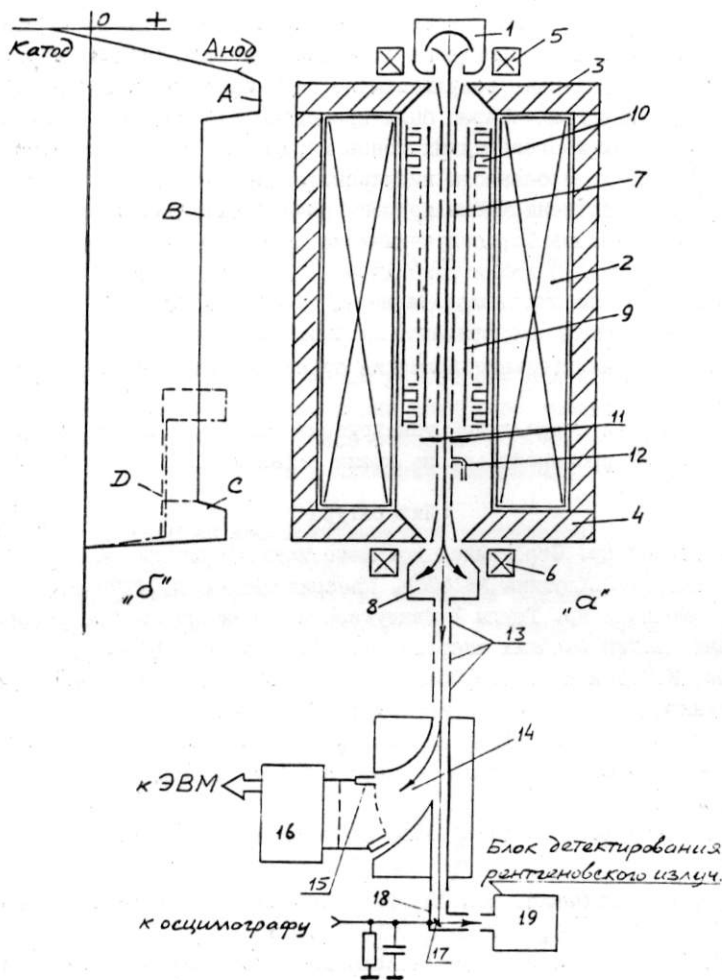


Рис.1. Схема электронно-лучевого источника ИМИ-I с диаграммой потенциалов.

а - схема ИМИ-I; 1 - сферическая короткофокусная пушка; 2 - фокусирующий соленоид; (3-4) - полоса магнитопровода; (5-6) - магнитные линзы; 7 - дрейфовая структура; 8 - электронный коллектор; 9 - внутренний нагреватель; 10 - распределенный МРН; 11 - твердые мишени; 12 - трубка напуска газа; 13 - электростатическая линза; 14 - магнитный анализатор; 15 - многослойная мишень; 16 - измеритель параметров пучка; 17 - бериллиевая мишень; 18 - ионный коллектор; 19 - блок детектирования рентгеновского излучения.

б - диаграмма распределения потенциалов; в - потенциал "дна" ионной ловушки; А - первый барьер ионной ловушки; С - второй барьер, сплошная линия при работе с твердыми элементами, пунктирная - при работе с газами; Д - промежуточный потенциал при выпуске ионов.

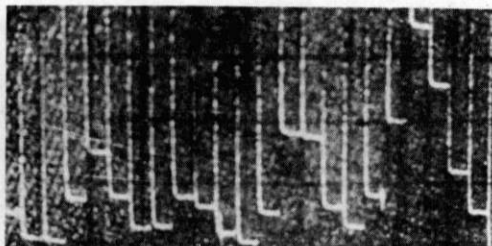


Рис.2. Спектр ионов Ti^{n+} , полученных за время 0,7 мс.

В 1983 г. в ИЯФ была запущена и испытана ЭОС ИМИ-1, затем в течение января-июня 1984 г. проводились эксперименты как на ЭОС, так и по ионизации различных элементов. Были проведены эксперименты по ионизации азота, при этом были получены надежные результаты по получению ядер азота N^{7+} в количестве более 10^7 ядер/имп. Затем были проведены весьма обнадеживающие эксперименты по получению многозарядных ионов металлов Al и Ti. При этом впервые была решена задача дозированного импульсного напуска атомов металлов в ионную ловушку непосредственно ионизирующим электронным пучком. На рис.2 приведена часть спектра ионов Ti, полученных за время ионизации 0,7 мс при энергии электронного пучка 8 кэВ и токе пучка 0,8 А, $j \approx 0,7+1 \cdot 10^3$ А/см².

Источник ИМИ-1 был поставлен Радиовому институту им. В.Г.Хлопина и в июле 1986 г. начаты эксперименты по ионизации.

В дальнейшем значительное внимание будет уделено индикации высокозарядных состояний ионов.

После установки специальной конструкции дрейфовой структуры выпуск ионов с $Z/A \approx 0,5$ будет производиться за время $\sim 1+2$ мкс.

Литература

1. В.Л.Ауслендер и др. Строящийся комплекс ионного синхротрона Радиового института им. В.Г.Хлопина АН СССР, Препринт РИ-56.Л., 1976 г.
2. В.Г.Абдульманов и др. Труды X Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий. т.1, Серпухов, 1977.
3. В.П.Шилов, Н.Н.Девятко, А.В.Поздняков. Определение требований к вакууму в камере синхротрона Радиового института. Препринт РИ-82, Л., 1977 г.
4. В.Л.Ауслендер, Г.Б.Глаголев, В.Н.Лазарев, А.А.Лившиц, Ю.В.Маклаков, В.Н.Осипов. Вакуумная система синхротрона Б-5. Препринт ИЯФ СО АН СССР 79-5, Новосибирск, 1979.
5. Е.Д.Донец. Авторское свидетельство 248860 (СССР). Бюллетень ОИПОТЗ № 24, 1969, с.65.
6. Е.Д.Донец, В.И.Илещенко, В.А.Альперт. Авторское свидетельство № 375708. Бюллетень ОИПОТЗ № 16, 1973 г., с.130.
7. Е.Д.Донец. Труды У Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. 1973, т.1, М., Наука, 1977, с.346.
8. J.Arianer, A.Cabrespine and C.Goldstein. Cryebis, an advanced multicharged ion source. part I. NIM 193 (1982) 401-413.
9. J.Arianer, A.Cabrespine, C.Goldstein and T.Junquera Cryebis, an advanced multicharged ion source. part II. NIM 198 (1982) 175-187.
10. В.Г.Абдульманов и др. Труды У1 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, т.П, Дубна, 1979.
11. В.Г.Абдульманов и др. Труды УП Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, т. I, Дубна, 1981.
12. В.Г.Абдульманов, Ю.М.Колокольников, И.Н.Мешков, А.Н.Шарапа. Электронно-оптическая система источника многозарядных ионов ИМИ-1. Настоящий сборник, с.79.
13. Э.А.Купер, В.В.Репков, О.П.Трезубов. Блок для измерения параметров пучков заряженных частиц (ИПП-32М). Препринт ИЯФ СО АН СССР 83-45, Новосибирск, 1983.
14. В.А.Трифонов, Г.А.Тутин, В.П.Зйсмонг, Е.Д.Донец. Рентгеновский полупроводниковый спектрометр на пучке источника высокозарядных ионов. Препринт РИ-159, Л., 1982.

ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ИСТОЧНИКА МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ ИМИ-1

В.Г.Абдульманов, Ю.М.Колокольников, И.Н.Мешков, А.Н.Шарапа
Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск

В электронно-лучевом источнике многозарядных ионов ИМИ-1, разработанном в ИЯФ СО АН СССР /1/, ключевым звеном является электронно-оптическая система (ЭОС).

Ионный источник ИМИ-1 разрабатывался для ускорительного комплекса протонно-ионного синхротрона Б-5, частота следования рабочих циклов которого 50 Гц ограничивает время ионизации ≤ 20 мс, поэтому для получения многозарядных ионов и ядер вплоть до Ar^{18+} необходимо обеспечить плотность электронного пучка в области ионизации до 10^3 А/см². Поле фокусирующего соленоида порядка 1 Т.

Первоначальный проект источника /2/, в котором требуемая плотность электронного пучка 10^3 А/см² достигалась при токе 10 А и не предусматривалась рекуперация электронного пучка на коллекторе, был слишком сложным и недостаточно эффективным. Поэтому, начиная с 1977 г., велась работа по созданию ЭОС с компрессией электронного пучка для получения плотности пучка 10^3 А/см² при токе около 3 А и рекуперацией энергии электронов на коллекторе. Проведенные эксперименты на макетах и системах питания /3-4/ позволили приступить к разработке рабочего варианта ЭОС источника, который был разработан и испытан в августе 1983 г.

Схема ЭОС ИМИ-1, сконструированного в вертикальном варианте (рис.1а), включает в себя частично экранированную от магнитного поля сферическую короткофокусную пушку, катод которой (1) имеет диаметр 16 мм, радиус кривизны 9,5 мм и изготовлен из LaB_6 . Диаметр отверстия в аноде (2) 8 мм. Первееанс пушки 1,8 мкА/В^{3/2}, удельная эмиссия при токе пучка 5 А не превышает 5 А/см², что определяет большой срок службы катодного узла. В пушке используется электронный подогрев катода, что в свою очередь исключает искажение магнитного поля на катоде полем подогревателя и повышает надежность катодного узла. Мощность, потребляемая электронным подогревом, не более 100 Вт.

Фокусирующий соленоид (3) биттеровского типа с замкнутым магнитопроводом и полюсами (4-5) создает фокусирующее поле до 0,9 Т. Магнитная линза (6) вместе с полюсом (4) обеспечивает формирование электронного пучка с параметром катодных условий, равным 1:

$$K = \left(\frac{\psi_K}{\psi_0} \right)^2 = 1, \quad (1)$$

где ψ_K - поток магнитного поля через катод, ψ_0 - поток магнитного поля через поперечное сечение электронного пучка в области однородного поля. Магнитная линза (7) вместе с полюсом (5) оптимально ослабляет магнитное поле в коллекторе, что обеспечивает практически зеркальное по отношению к катоду распределение поля. На приемной поверхности электронного коллектора поле $B_{кол} = 0,10$ Тс.

Проводка электронного пучка высокой плотности $\sim 10^3$ А/см² с первееансом до 3 мкА/В^{3/2} осуществляется в дрейфовой структуре. Она состоит из входной конусной диафрагмы (8) (диаметры 7 мм и 4 мм соответственно), трубок дрейфа (9) с внутренним диаметром 5 мм и выходного конуса (10), диаметр на выходе которого 7 мм. Длина дрейфовой структуры 49 см.

Охлаждаемый водой электронный коллектор (12) имеет на входе супрессорный электрод (11), запирающий вторичную эмиссию из коллектора. Распределение потенциалов приведено на рис.1б.

В ЗЭС ИМИ-1 применена частичная экранировка электронного коллектора от магнитного поля соленоида. С помощью магнитной линзы (7) степень экранировки регулируется, и соответственно регулируется распределение (развал) электронного пучка в коллекторе. В процессе отработки выбирается оптимальный уровень экранировки по минимуму относительных потерь пучка на всем тракте ЗЭС.

Через отверстие в коллекторе диаметром 10 мм осуществляется вывод ионов из источника. Следующие за электронным коллектором элементы ионной оптики могут служить одновременно как для контроля тока электронов из коллектора, так и для полного их запираания.

Устировка ЗЭС производится по электронному пучку. При этом вся структура, включая анод и коллектор, находится под нулевым потенциалом, что позволяет безопасно проводить устировку ЗЭС. Импульс напряжения отрицательной полярности подается на катод от специального импульсного модулятора. Длительность импульса модулятора регулируется от 100 до 300 мкс, а амплитуда от 0 до 6 кВ.

Устировка соосности катода и анода с точностью $\sim 0,01$ мм проводится при атмосферном давлении, при этом фиксируется зазор между анодом и верхним конусом дрейфовой структуры. При устировке по пучку, по минимуму токооседания на верхний конус и анод, электронная пушка и верхний входной конус устанавливаются соосно. Затем устируются соосно электронная пушка и вся дрейфовая структура, что контролируется по 3-ламельному датчику положения пучка (ирисовая диафрагма), расположенному в нижнем выходном конусе, где фокусирующее поле по абсолютной величине в 2 раза меньше стационарного. При сведенной диафрагме в ее отверстие вписывается окружность, диаметр которой 0,7 мм. Путем незначительных, ± 2 мм, смещений нижнего фланца соленоида относительно верхнего, зафиксированного в магнитопроводе, удается выставить электронный пучок строго по центру датчика. При этом энергия пучка не должна превышать 2 кэВ, чтобы не разрушить датчик.

Большое внимание было уделено разработке сферической короткофокусной пушки, которая бы обеспечивала относительные потери пучка на аноде порядка $1 \cdot 10^{-3}$. Известные разработки диодных сферических пушек при значительной компрессии пучка (до 10^2 и выше) имеют высокие относительные потери пучка на аноде, около 10^{-2} . Трехэлектродная система, в которой на 2-й анод подается потенциал, существенно больший потенциала первого анода, обеспечивает заметное снижение токооседания, однако для источника ИМИ-1 осуществление этого варианта связано с большими конструктивными трудностями.

Было отмечено, что расчетная граница пучка у сферических пушек с уменьшенным по сравнению с пушками мюллеровского типа радиусом кривизны катода и приближенным к катоду прикатодным электродом (рис.2) находится существенно дальше от анода, чем у последних. Это в свою очередь должно существенно уменьшить влияние на пучок аберраций анодной линзы. В итоге удалось реализовать конструкцию такой пушки, обладающую высокой стабильностью характеристик в течение более чем двух тысяч часов эксплуатации.

Следующей, не менее важной, задачей была необходимость точного согласования магнитного и электрического полей в области катод-анод и обеспечения катодных условий (I) для всего электронно-оптического тракта. Наиболее критичным это условие является в области от катода до кроссовера электронного пучка. Надежных расчетных методов для аксиально-симметричных магнитных полей со столь большим градиентом пока нет: на катоде величина индукции не превышает 5 Гс (при однородном фокусирующем поле $B_0 = 5$ кГс), но уже в 18 мм от катода индукция равна 0,5 кГс.

Моделирование конфигурации магнитной диафрагмы в верхнем полюсе и отверстия

в ней проводилось экспериментально. Магнитное поле измерялось вдоль оси ЗОС прибором III I-8. Пробное измерение поля вне оси показало несущественное отличие результатов по сравнению с измерениями вдоль оси и последующим использованием параксиального приближения.

В плоскости кроссовера обеспечено условие магнитной фокусировки электронного пучка

$$B = (1.2 + 1.5) B_0,$$

где B_0 - соответствующее бриллоновское поле для данного радиуса пучка. Величина поля в этой точке около $0,1 B_0$, где B_0 - стационарное магнитное поле в области дрейфа.

До кроссовера осуществляется электростатическая компрессия пучка примерно в 10^2 , а затем производится компрессия пучка еще в 10 раз в нарастающем фокусирующем магнитном поле соленоида. Следовательно, полная компрессия пучка составляет около 10^3 .

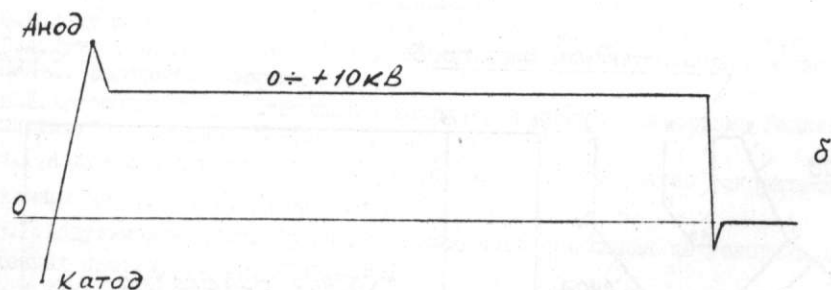
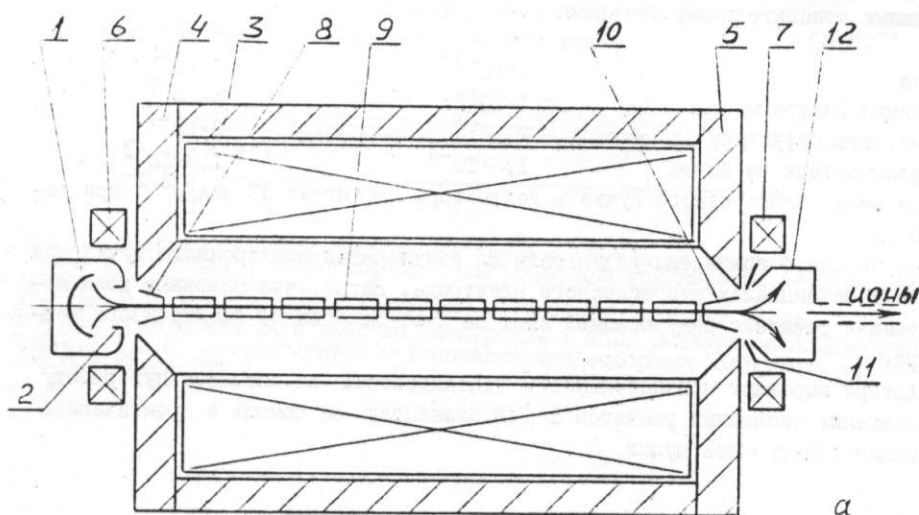


Рис. I. Схема ЗОС ИЛИ-1 и диаграмма потенциалов.

а - схема ЗОС; 1 - катод электронной пушки; 2 - анод; 3 - фокусирующий соленоид; (4-5 - полюса магнитопровода; (6-7 - магнитные линзы; 8 - входная диафрагма; 9 - трубки дрейфа; 10 - выходной конус; 11 - супрессорный электрод; 12 - электронный коллектор.
б - диаграмма распределения потенциалов.

Испытания ЭОС ИМИ-1, проведенные в 1983-1984 гг., показали, что ЭОС обеспечивает работу ИМИ-1 с частотой 50 Гц при длительности рабочего цикла до 20 мс. За время испытаний проводилась работа с током электронного пучка 2,5 А при длительности импульса 17 мс с частотой 50 Гц. Относительные потери пучка на закрытой ирисовой диафрагме (диаметр 0,7 мм), где поле вдвое меньше стационарного V_0 , составляют 10+15%. При разведении диафрагмы до диаметра 0,9 мм потери тока пучка уменьшались до 3+5%, а при разведении до диаметра 1,1 мм пучок проходил полностью вместе с ореолом. Таким образом можно утверждать, что эффективный диаметр пучка в области диафрагмы датчика не превышает 0,7 мм, а в области стационарного поля (в рабочей области) диаметр пучка не более 0,5 мм. Опыты с прожиганием металлических фольг подтвердили эти результаты.

Средняя плотность электронного пучка $\bar{j} = 1 \cdot 10^3 \text{ А/см}^2$ достигается при токе 2А. С учетом реального распределения тока в пучке в его центральной области плотность $j = 1 \cdot 10^3 \text{ А/см}^2$ достигается уже при токах 0,7+1 А.

Прохождение пучка через электронно-оптическую систему характеризуется следующими относительными потерями тока пучка:

	режим без рекуперации	с рекуперацией
на анод	$3 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-4}$
на входную диафрагму	$1 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
на дрейфовую структуру	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$
суммарные потери не более	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$

Переванс электронного пучка в коллекторе достигает $37 \text{ мкА/В}^{3/2}$ при токе 1,5 А.

На рис.3а,б приведены результаты по рекуперации электронного пучка при различных потенциалах супрессорного электрода. Видно, что основная доля потерь тока в режиме с рекуперацией идет за счет эмиссии из электронного коллектора.

Авторы выражают признательность Т.Н.Андреевой за значительную работу по проведению численных расчетов и Г.И.Кузнецову за помощь в практической реализации электронной пушки.

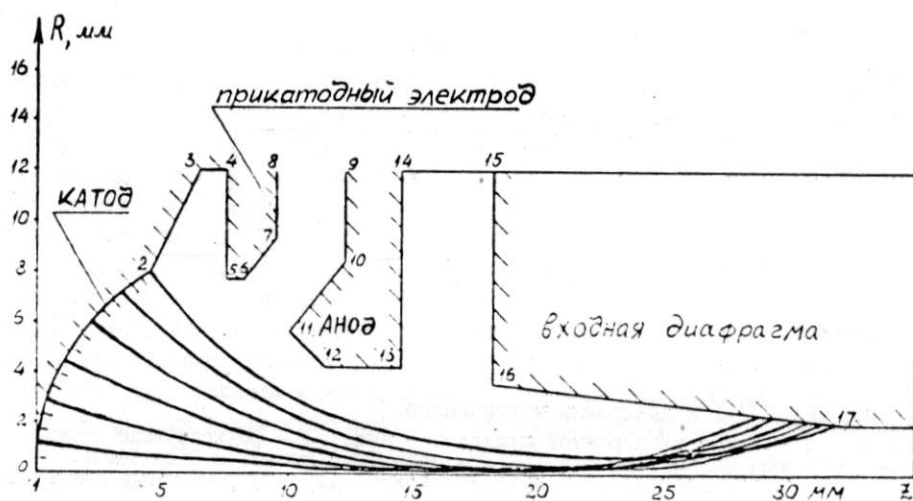


Рис.2. Расчетные траектории в электронной пушке.

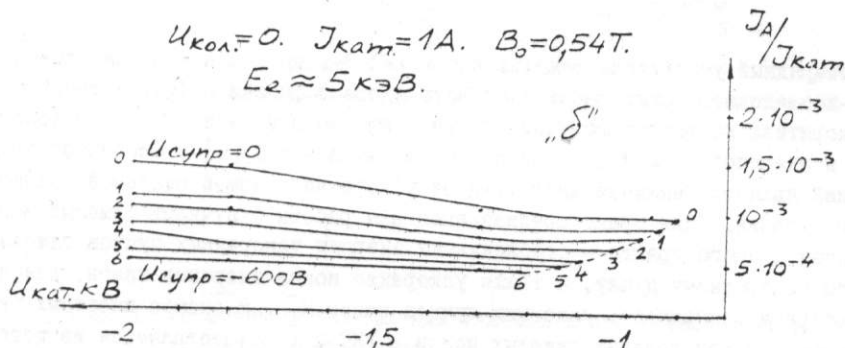
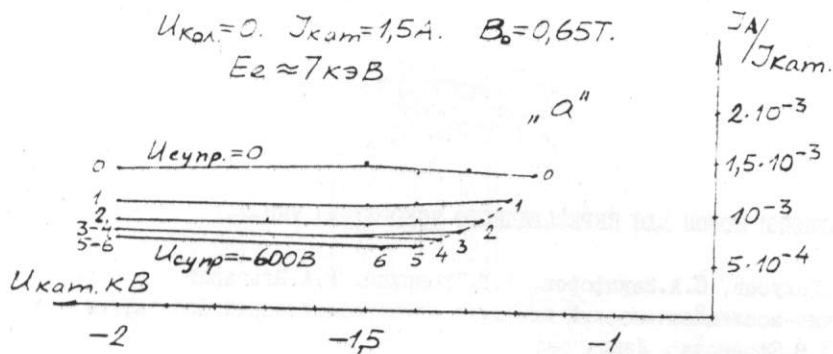


Рис.3. Зависимость относительных потерь тока пучка на аноде от потенциала катода и потенциала супрессорного электрода при рекуперации энергии электронов на коллекторе.
а - при токе пучка 1,5 А и энергии электронов в области дрейфа 7 кэВ;
б - при токе пучка 1 А и энергии электронов 5 кэВ. Экспериментальные кривые 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 соответствуют потенциалам супрессорного электрода от 0 до -600 В через 100 В.

Литература

1. В.Г.Абдульманов, В.Л.Ауслендер, Ю.М.Колокольников, И.Н.Мешков, В.Г.Потапов, Г.А.Тутин, В.П.Эйсмонт. Электронно-лучевой источник многозарядных ионов ИМИ-Г. Настоящий сборник, с.51.
2. В.Л.Ауслендер и др. Строящийся комплекс ионного синхротрона Радиевого института. Препринт РИ-56. М., 1976 г.
3. В.Г.Абдульманов и др. Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.П, Дубна, 1979.
4. В.Г.Абдульманов и др. Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.Г., Дубна, 1981.
5. В.И.Куделайнен, И.Н.Мешков, В.В.Пархомчук, Р.А.Салимов, А.Н.Скринский, В.Г.Файнштейн "Глубокое торможение электронного пучка в системе с продольным магнитным полем". ЛТЭ, том 46. в.8, 1976 г. стр.1678.

СОСТОЯНИЕ РАБОТ ПО СОЗДАНИЮ РАЗРЕЗНОГО МИКРОТРОНА
В ИЯФ СО АН СССР

В.Е.Акимов, Т.Е.Вечеславова, Н.А.Винокуров, П.Д.Воблый,
Н.Г.Гаврилов, М.М.Карлинер, Е.В.Козырев, Г.Н.Кулипанов,
В.Н.Литвиненко, И.Г.Макаров, О.А.Нежевенко, Г.Н.Острейко,
Б.З.Персов, И.Я.Протопопов, С.И.Рувинский, Г.В.Сердобинцев,

А.Н.Скринский, Э.М.Трахтенберг, В.П.Яковлев

Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск

В Институте ядерной физики СО АН СССР ведутся работы по созданию разрезного микротрона на энергию 30 МэВ. Схема микротрона показана на рис.1. Микротрон состоит из инжектора I, двух 180-градусных основных поворотных магнитов 2, общего (для частиц с разными энергиями) прямолинейного промежутка, где установлены ускоряющая ВЧ-структура 3, впускные магниты 4, 5 и квадрупольная линза 6, и девяти раздельных прямолинейных промежутков.

Основные поворотные 180-градусные магниты являются магнитными зеркалами (см., например, [1]). Небольшой градиент магнитного поля в направлении вдоль прямолинейных промежутков обеспечивает вертикальную фокусировку электронов с фокусным расстоянием около 10 м. Для улучшения однородности поля между ярмом и плоскими листовыми полосными накладками имеются воздушные зазоры 7 величиной 1 мм. Рабочий зазор магнита равен 30 мм. Для компенсации вертикальной дефокусировки краевым полем магнита служат краевые полюса с обратным полем 8. Внутри магнита вставлена вакуумная камера с вертикальной апертурой 20 мм.

В начале раздельных прямолинейных промежутков установлены пары корректирующих магнитов 9.

Квадрупольная линза 6 фокусирует электроны по горизонтали. Этой же цели служат косые края впускных магнитов 4, 5. Последние представляют собой скомпенсированную тройку (5 - блок, состоящий из двух магнитов), которая не изменяет траектории частиц вне впускного промежутка. Внутри ускоряющей структуры встроены три линзы с продольным магнитным полем. В самом начале стоит электромагнитная линза 10, а две другие находятся в пролетных трубках II и выполнены с использованием постоянных самарий-кобальтовых магнитов. Каждая из этих трех линз имеет нулевой интеграл продольного поля и поэтому они не создают связи горизонтальной и вертикальной степеней свободы.

В микротрон инжектируются ступки электронов с энергией 40 кэВ и фазовой протяженностью около 30 градусов. Впуск производится магнитом 4, перед которым установлен фокусирующий соленоид 12. После первого прохода через ускоряющую структуру и основной поворотный 180-градусный магнит 2 электроны последовательно пролетают через магниты 13, 14, 180-градусные магниты 15, 16 и магниты 14 и 17, после чего второй раз попадают в ускоряющую структуру. Такой довольно сложный первый оборот позволяет обойти снизу ускоряющую структуру, подобрать оптимальную фазу второго прохода электронов через ускоряющую структуру и согласовать продольный эмиттанс пучка после первого прохода через ускоряющую структуру с продольным акцептансом микротрона.

Параметры ускоряющей структуры микротрона приведены в таблице 1. Структура представляет собой цепочку из девяти резонаторов, связанных через общий коаксиальный резонатор 18. Резонаторы структуры снабжены шунтируемыми нагрузками для подавления высших мод, возбуждаемых пучком. Перестройка ускоряющей структуры производится изменением резонансной частоты коаксиального резонатора при перемещении бесконтактного коаксиального замыкателя. Мощность вво-

Таблица 1

Рабочая частота	915 МГц
Шунтовое сопротивление ускоряющей структуры	35 МОм/м
Добротность	20000
Коэффициент связи	1,8%
Набор энергии на одном проходе	3 МеВ

Таблица 2

Энергия электронов	280 кэВ
Мощность электронного пучка	2,5 МВт
Длительность импульса	50 нкс
Частота повторения	2 имп/с
Выходная мощность	1,7 МВт
К.п.д.	65%
Электронный к.п.д.	74%
Коэффициент усиления	26 дБ

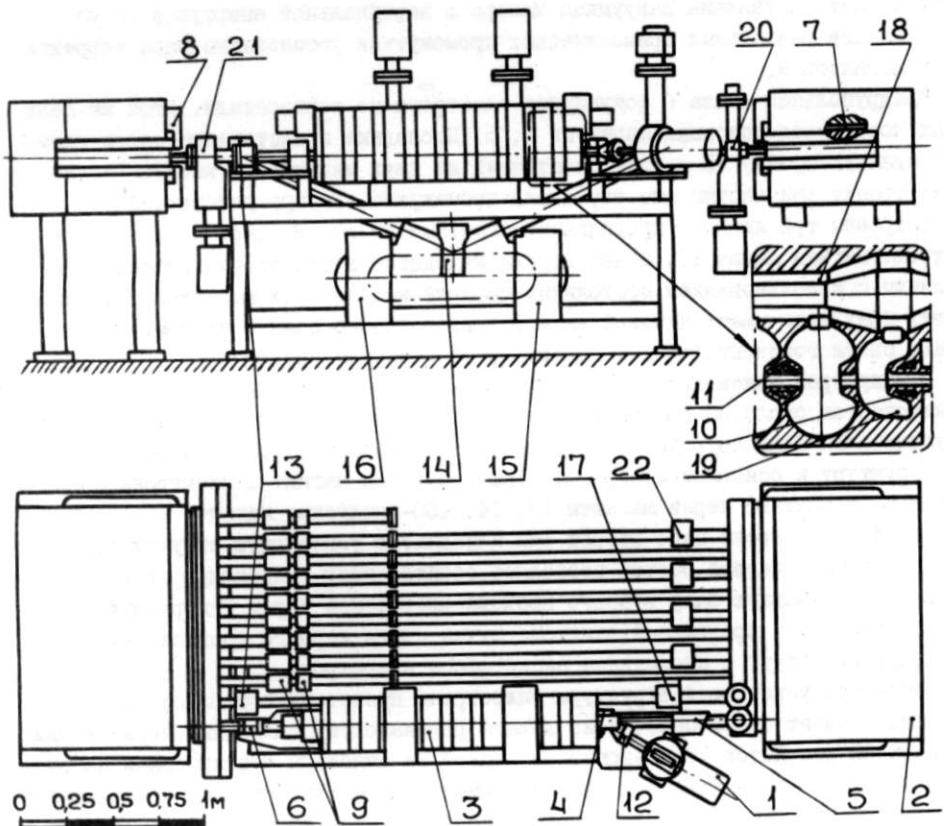


Рис. 1.

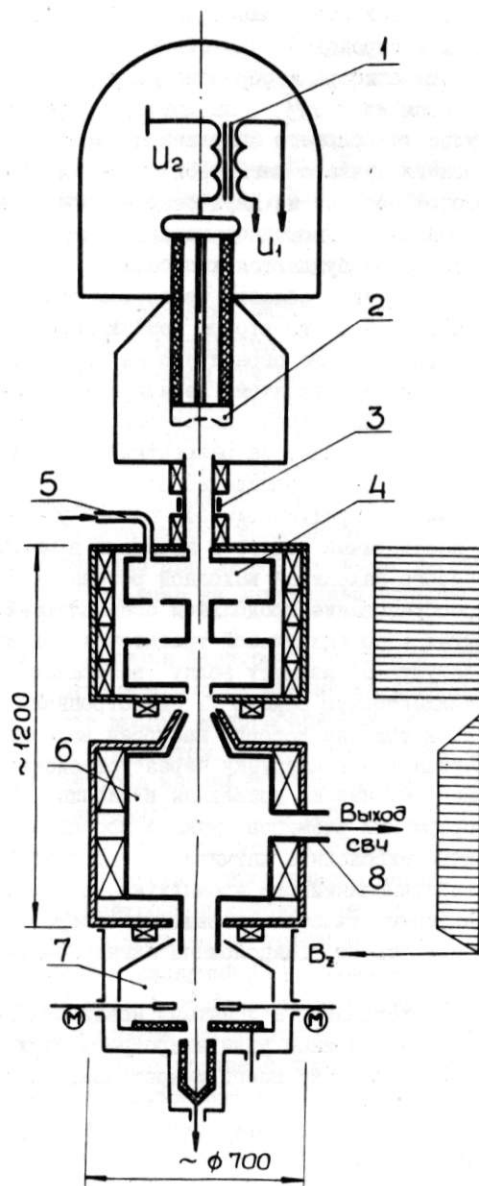


Рис. 2.

дится в коаксиальный резонатор через согласующий четвертьволновой трансформатор. Для оптимизации ускорения частиц при первом проходе через ускоряющую структуру ее первый резонатор I9 деформирован.

Источником ВЧ мощности для микротрона является магникон – новый СВЧ генератор с круговой разверткой пучка электронов [2]. Магникон представляет собой дальнейшее развитие гирокона [3].

Конструктивная схема прибора изображена на рис.2. Источником электронов является пушка 2 с катодом из LaB_6 , на которую через повышающий трансформатор I подается импульс ускоряющего напряжения. Электронно-оптический канал 3 (служит для согласования пучка с магнитной системой устройства круговой развертки 4 [4], которое состоит из двух резонаторов, помещенных в общий соленоид, создавший продольно-однородное магнитостатическое поле величиной около 1 кГс. В резонаторах возбуждаются колебания E_{110} с круговой поляризацией магнитного поля в присоединенной области (в первом резонаторе – от внешнего источника через ввод мощности 5, во втором возбуждение производится самим пучком). Постоянное магнитное поле ограничено на определенном расстоянии от выхода из резонаторов магнитным экраном. Величина и направление магнитостатического поля выбираются такими, чтобы циклотронная частота Ω была в два раза выше величины ω (ω – частота развертки), а направления циклотронного вращения и вращения ВЧ поля совпадали. Электронный пучок покидает устройство развертки вблизи оси практически без потери угла отклонения. Далее электроны выходят на необходимый радиус и попадают в магнитостатическое поле соленоида, внутри которого находится выходной резонатор 6. При этом происходит дополнительное преобразование продольной составляющей скорости в поперечную вращательную. Двигаясь по спиральной траектории, электроны возбуждают в выходном резонаторе бегущую по азимуту волну (колебания E_{110}) и, отдав свою энергию, попадают в коллекторную секцию 7. Циклотронная частота должна быть близка к рабочей, т.е. к той, на которую настроен выходной резонатор. Полученная ВЧ мощность передается в нагрузку через устройство вывода 8.

Примеры работающего магникона приведены в таблице 2.

Для измерения поперечных размеров пучка и координат его центра тяжести служат сеточные вторичноэмиссионные датчики 20, 21 (рис.1). Они установлены по обоим концам общего прямолинейного промежутка, в начале каждого отдельного промежутка и на наклонных участках первичного оборота. На концах нечетных промежутков, начиная с третьего, расположены магнитно-индукционные датчики положения пучка 22.

В настоящее время изготовлены и испытаны новый СВЧ генератор – магникон и инжектор микротрона. Все основные узлы микротрона также изготовлены и начата сборка и подготовка к запуску всего микротрона.

Литература

1. В.М.Кельман, С.Я.Явор. Электронная оптика. Ленинград, "Наука", 1968.
2. Карлинер М.М. и др. Электронный прибор СВЧ-магникон: А.с. СССР № 1110335 ОИ, 1966, № 4, с.261.
3. Budker G.I. et al. Particle Accel., 1979, Vol.10, p.41.
4. Карлинер М.М. и др. Устройство для получения круговой развертки пучка заряженных частиц: А.с. СССР № 1043761. – О.И., 1983, № 35, с.242.