

# Электронные и ионные пучки

УДК 537.533

## Фокусирующая сверхпроводящая магнитная система электронно-лучевого источника многозарядных ионов MIS-1

В. Г. Абдульманов, П. Д. Воблый, В. Ф. Куликов, В. М. Сыроватин, А. В. Уткин  
Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

*Для электронно-лучевого источника многозарядных ионов разработана фокусирующая сверхпроводящая магнитная система, совмещенная по оси с электронно-оптической системой. Магнитная система создает фокусирующее поле величиной 3 Тл вдоль оси дрейфовой структуры ионного источника.*

Электронно-оптическая система разрабатываемого в БИЯФ варианта электронно-лучевого источника многозарядных ионов MIS-1, сокращенного по длине в два раза [1–3], обеспечивает плотность электронного пучка в ионной ловушке до  $2 \cdot 10^3$  А/см<sup>2</sup> при токе 20 А и энергии электронов 40–50 кэВ. Длина ионной ловушки ~ 80 см, а ее емкость по электронам — до  $0,8 \cdot 10^{12}$ . Внутренний диаметр электродов дрейфовой структуры, по оси которой проходит электронный пучок, не более 5 мм. Дрейфовая структура размещена по оси вакуумной камеры диаметром 250 мм.

### Фокусирующая сверхпроводящая магнитная система

Для обеспечения ламинарности электронного пучка с данными параметрами разработана совмещенная по оси с электронно-оптической системой аксиально-симметричная магнитная фокусирующая система, включающая в свой состав сверхпроводящий соленоид длиной 1 м с магнитопроводом, находящимся при комнатной температуре, две электромагнитные линзы, расположенные в области электронной пушки, и электронный коллектор. Магнитная система создает фокусирующее магнитное поле величиной 3 Тл вдоль оси дрейфовой структуры ионного источника на длине ~ 800 мм. При этом обеспечиваются необходимое согласование магнитных и электрических полей в области короткофокусной сферической электронной пушки, диаметр катода 34 мм, радиус кривизны катода 21,5 мм (рис. 1). Распределение магнитного поля в электронном коллекторе обеспечивает высокий уровень рекуперации энергии электронного пучка.

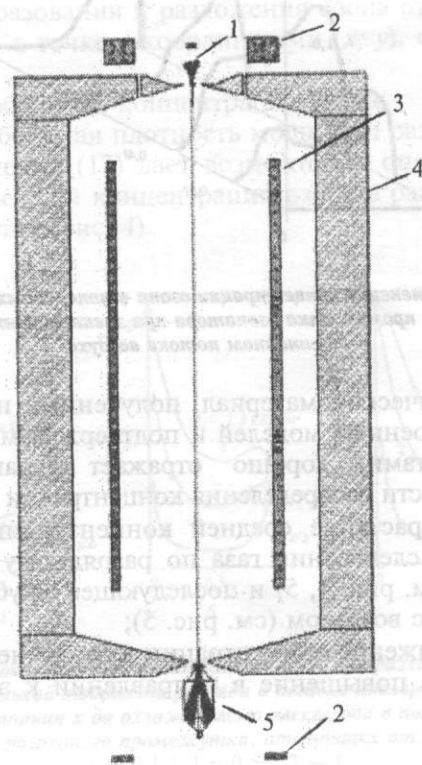


Рис. 1. Распределение силовых линий магнитного поля в источнике MIS-1:

1 — катод электронной пушки; 2 — электромагнитные линзы; 3 — сверхпроводящий соленоид; 4 — магнитопровод; 5 — электронный коллектор

Расчеты магнитной системы источника MIS-1 проводились с помощью созданной в БИЯФ компьютерной программы “Мермейд”.

Система MIS-1 имеет вертикальную конструкцию и состоит из сверхпроводящего соленоида длиной 1 м, размещенного в криостате, наружного магнитопровода, двух электромагнитных линз, расположенных в области электронной пушки, и электронного коллектора.

Сверхпроводящий соленоид диаметром 38 см и максимальным магнитным полем на оси 3 Тл обладает большим запасом энергии магнитного

поля 440 кДж. При срыве сверхпроводимости при такой запасенной энергии магнитного поля произойдет разрушение сверхпроводящей катушки соленоида. Для предотвращения этого соленоид выполнен в виде трех секций длиной: первая — 33 см; вторая — 34 см; третья — 33 см, зашунтированных резисторами. В этом случае при срыве сверхпроводимости в одной из секций соленоида в катушку последнего поступит только 1/3 запасенной магнитной энергии всего соленоида.

Намотка секций соленоида выполнена профилированной и разбита на 11 участков (рис. 2), это позволяет исключить влияние разрывов в намотке соленоида в местах соединения секций на магнитное поле на оси соленоида. Увеличение плотности тока на концах сверхпроводящей обмотки соленоида дает возможность получить высокую однородность фокусирующего магнитного поля на длине 80 см вдоль оси с отклонениями значений ~ 3 % при значении магнитного поля  $B = 3$  Тл (рис. 3). При этом наружный магнитопровод и магнитные диафрагмы источника остаются немагнитными, что обеспечивает постоянство заданной конфигурации магнитного поля в области электронной пушки и коллектора электронов вне зависимости от магнитного поля в сверхпроводящем соленоиде.

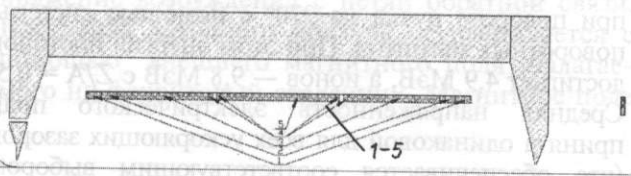


Рис. 2. Распределение тока в сверхпроводящем соленоиде, кА:  
1 — 150; 2 — 200; 3 — 576; 4 — 36; 5 — 720

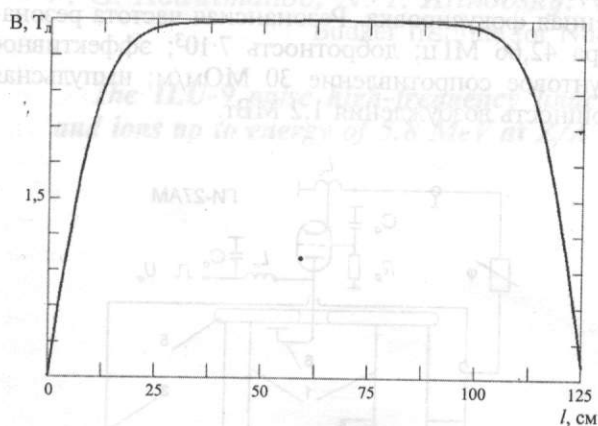


Рис. 3. Распределение магнитного поля по оси сверхпроводящей обмотки соленоида

По оси магнитной фокусирующей системы, в верхнем полюсе, находятся магнитная диафрагма специальной формы и электромагнитная линза, которые обеспечивают точное согласование магнитного и электрического полей в области электронной пушки от катода до кроссовера (см. рис. 1).

По оси магнитной фокусирующей системы, в нижнем полюсе, в области электронного коллектора расположены вторая магнитная диафрагма специальной формы и электромагнитная линза, которые создают необходимый спад магнитного поля в электронном коллекторе для обеспечения высокой степени рекуперации электронного пучка (см. рис. 1).

Для полного совмещения осей электронно-оптической и магнитной систем предусмотрена юстировка криостата со сверхпроводящей обмоткой соленоида внутри магнитопровода.

### Заключение

В целях минимизации размеров системы и повышения однородности фокусирующего магнитного поля на оси вдоль дрейфа электронного пучка криостат состоит из двух соединенных друг с другом частей. Основная часть со сверхпроводящим соленоидом расположена внутри магнитопровода, вторая часть с запасом жидкого гелия и азота для работы соленоида — снаружи его. В ней размещены токовыводы на 300 А для обмотки соленоида. В рабочем состоянии из криостата испаряется в сутки 3 л жидкого гелия и 4 л жидкого азота. Запас жидкого гелия и азота обеспечивает работу сверхпроводящего соленоида в течение не менее 48 ч.

### Литература

1. Abdul'manov V. G., Korotkova V. L., Maslennikov O. Yu., Nevsky P. V., Rybachek V. P., Fedyayev V. K. Electron-Optic System of the Multicharge Ion Source (MIS-1) // Proceedings of SPIE. 2000. V. 4187. P. 56—61.
2. Abdulmanov V., Nevsky P., Rybachek V., Fedyayev V. Simulation of the High Power Electron Beam Formation and Recuporation Designed for Ion Source // Proceeding of the 13<sup>th</sup> International Conference on High Power Particle Beams BEAMS - 2000. — Nagaoka, Japan, June 25—30, 2000. P. 885—888.
3. Abdulmanov V. G., Maslennikov O. Yu., Nevsky P. V., Rybachek V. P., Fedyayev V. K. Electron-Optic System Of The Multicharge Ion Source (MIS-1) // Electron beam Ion Sources and Their Applications, 8<sup>th</sup> Intl. Symp. — American Institute of Physics, 2001. P. 170—177.

## Focalizing superconducting system for the MIS-1 electron beam source of multiply charged ions

V. G. Abdulmanov, P. D. Vobly, V. F. Kulikov, V. M. Syrovatin, A. V. Utkin  
Budker Institute for Nuclear Physics, Novosibirsk, Russia

*For the electron beam source of multiple charged ions the focalizing superconducting magnet system have been designed. It is mated with an electron-optical system on an axis. The magnet system creates a focusing field of 3 Tl along an axis of a drift structure of the ion source.*

УДК 537.533

## Протонно-ионный линейный ускоритель ИЛУ-9

В. Г. Абдульманов, Н. И. Алиновский, В. Л. Ауслендер,  
А. Ф. Байдак, А. Д. Панфилов

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

*Импульсный высокочастотный линейный ускоритель ИЛУ-9 может ускорять протоны до энергии 2,0 МэВ и ионы — до энергии 5,8 МэВ при  $Z/A = 0,5$ .*

Описан импульсный протонно-ионный высокочастотный линейный ускоритель ИЛУ-9 (рис. 1) с энергией ускоренных протонов по основному каналу 2,9 МэВ и с возможностью ускорения до энергии 5,8 МэВ ионов с  $Z/A = 0,5$ .

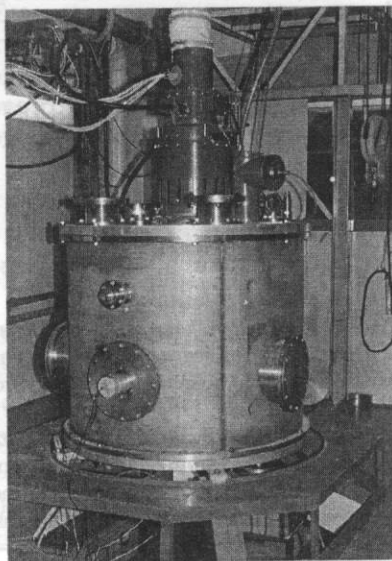


Рис. 1. Общий вид ускорителя ИЛУ-9

Схема ускорителя представлена на рис. 2. Основу его составляет высокочастотный резонатор, выполненный в виде закороченной на одном конце противофазно возбуждаемой четвертьволновой несимметричной экранированной двухпроводной коаксиальной линии 1, а на другом конце нагруженной емкостью дрейфовых трубок 2. Диаметр внешнего экрана 3 — 1100 мм, высота — 920 мм. Основной канал ускорения

содержит восемь ускоряющих зазоров и шесть дрейфовых трубок с длинами, определяемыми темпом ускорения. Предусмотрен дополнительный канал ускорения с тремя дрейфовыми трубками 4 при повороте пучка на  $270^\circ$  с помощью системы поворотных магнитов. При этом энергия протонов достигнет 4,9 МэВ, а ионов — 9,8 МэВ с  $Z/A = 0,5$ . Средняя напряженность электрического поля принята одинаковой для всех ускоряющих зазоров (что обеспечивается соответствующим выбором конструктивных параметров двухпроводной линии) и составляет 150 кВ/см при ускорении ионов с  $Z/A = 0,5$ . В ускорителе используется фазопеременная фокусировка. Резонансная частота резонатора 42,66 МГц; добротность  $7 \cdot 10^3$ ; эффективное шунтовое сопротивление 30 МОм/м; импульсная мощность возбуждения 1,2 МВт.

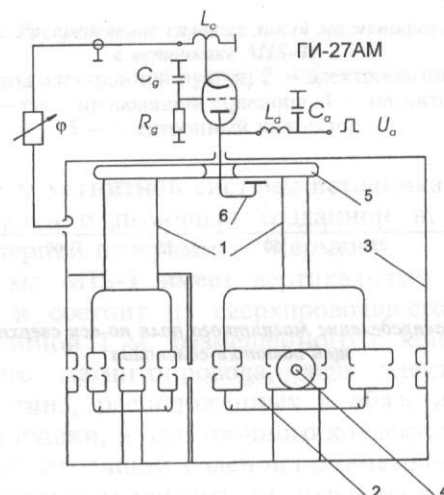


Рис. 2. Принципиальная схема ускорителя



Двухпроводная линия изолирована от внешнего экрана и находится под постоянным потенциалом 7 кВ для подавления низковольтного резонансного высокочастотного разряда (РВР). Напряжение смещения подается в точку минимума высокочастотного напряжения в середине закорачивающего диска 5.

При расчетах динамик движения частиц использовалось экспериментально измеренное методом пробного тела распределение электрического поля на оси ускоряющих зазоров. Ожидаемый эмиттанс ионного пучка ИЛУ-9 составляет  $10^{-3}$  см·рад.

Резонатор возбуждается от однокаскадного автогенератора на лампе ГИ-27АМ при внешней обратной связи через резонатор. Автогенератор расположен непосредственно на резонаторе и связан с ним с помощью индуктивной петли без применения промежуточного фидера.

Катодный контур для согласования входного сопротивления лампы с волновым сопротивлением кабеля обратной связи выполнен в виде высокочастотного ферритового автотрансформатора  $L_0$  (см. рис. 2) с коэффициентом трансформации  $K_{tr} = 1:2$ . Кольцевой ферритовый сердечник охвачен объемным витком обмотки, середина которого соединена непосредственно с выводом катода лампы, а на его начало через фазовращатель tromбонного типа подается напряжение возбуждения с петли обратной связи. Настройка катодного контура осуществляется с помощью внешнего магнитного поля, налагаемого на ферритовый сердечник. Магнитное поле

создается электромагнитом, между полюсами которого размещен катодный контур. Применение указанной конструкции одновременно решает несколько задач, а именно: уменьшаются габаритные размеры катодного контура, выполняются условия согласования низкого входного сопротивления лампы с волновым сопротивлением фидера обратной связи и, наконец, осуществляется бесконтактная настройка контура на частоту резонатора.

### Заключение

При испытании на стенде был получен пучок протонов с энергией 2,9 МэВ и импульсным током 2 мА при разбросе энергии  $< \pm 0,25 \%$  при фазовом угле захвата  $40^\circ$ .

При установке на ускорителе группирователя со стороны инжекционного канала угол захвата вырастает приблизительно в пять раз, а импульсный ток ускоренных протонов — соответственно, до 10 мА при том же энергетическом разбросе.

Данный ускоритель может быть использован как инжектор в ионных ускорительных комплексах\*.

\* Абдулманов В. Г., Авербух И. И., Ауслендер В. Л. и др. Ускорительный комплекс синхротрона Б-5 Радиового института: Тр. XII Всес. совещ. по ускорителям заряженных частиц. — Дубна, 1992. Т. 2. С. 106.

## ILU-9 proton and ion linac

V. G. Abdulmanov, N. I. Alinovsky, V. L. Auslender, A. F. Baidak, A. D. Panfilov  
Budker Institute for Nuclear Physics, Novosibirsk, Russia

*The ILU-9 pulse high-frequency linac can accelerate protons up to energy of 2.0 MeV and ions up to energy of 5.8 MeV at  $Z/A = 0.5$ .*

\* \* \*