

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ИОННЫЙ ИСТОЧНИК MIS-1

В. Г. Абдульманов, Н. С. Диканский

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

В ИЯФ разрабатываются и реализуются электронно-лучевые источники многозарядных ионов, в которых обеспечивается высокая плотность электронного пучка в области ионизации — в ионной ловушке $\geq 10^3$ А/см². Данные ионные источники обеспечивают получение многозарядных ионов различных элементов, как газообразных, так и твердых. В этих источниках успешно реализован метод импульсного дозированного напуска атомов твердых элементов в ионную ловушку.

INP develops and produces electron-beam ion sources of multicharge ions. These ion sources provide a high density of the electron beam in the ionization area at the ion trap $\geq 10^3$ A/cm². They produce multicharge ions of various elements, both gaseous and solid ones. These ion sources successfully employ the technique of the dozed inlet of solid elements atoms into the ion trap.

PACS: 29.25.-t; 29.25.Ni

В настоящее время разработан и изготовлен электронно-лучевой ионный источник MIS-1, фокусирующая магнитная система которого создана на основе сверхпроводящего соленоида с замкнутым магнитопроводом (рис. 1). Она обеспечивает однородное магнитное поле 3 Тл в дрейфовой структуре на длине 700 мм. Расчетная компрессия электронного пучка не менее 10^3 , что обеспечивает его плотность в зоне ионизации $2 \cdot 10^3$ А/см² при токе электронного пучка 20 А.

Для получения такой компрессии электронного пучка применяется двухступенчатая компрессия.

Вначале электростатическая компрессия в сферических электронных пушках порядка 10^2 , а дальнейшая, > 10 , обеспечивается максимально аксиально-симметричным фокусирующим магнитным полем.

Фокусирующая магнитная система ионного источника MIS-1 создана на основе сверхпроводящего соленоида длиной 1 м на поле 3 Тл.

Электронно-оптическая система (ЭОС) MIS-1 рассчитана на получение электронного пучка 20 А при энергии 50 кэВ и создана на основе короткофокусной электронной пушки, сферический импрегнированный катод которой имеет диаметр 34 мм, а радиус кривизны 21,5 мм. Результирующая компрессия электронного пучка не менее 10^3 . В зоне ионизации плотность электронного пучка $2 \cdot 10^3$ А/см² на длине 700 мм. Емкость ионной ловушки $\sim 10^{12}$ (см. рис. 2 и 3).

ЭОС данных электронно-лучевых ионных источников обеспечивают высокий уровень рекуперации энергии электронного пучка в электронном коллекторе 30 мкА/В^{3/2}.

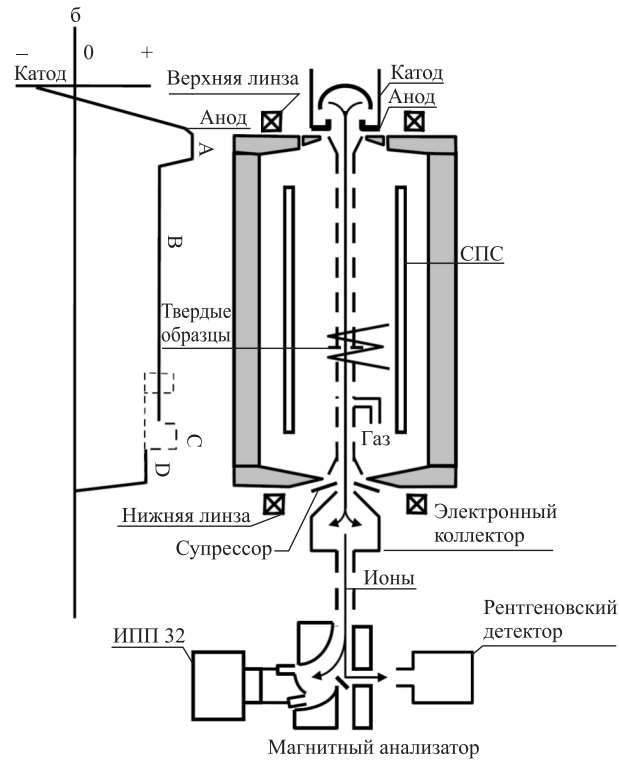


Рис. 1. Схема установки MIS-1

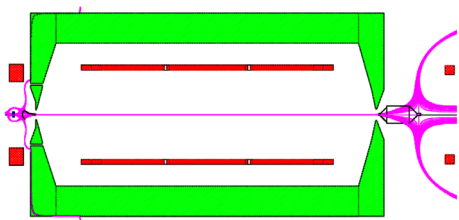


Рис. 2. Структура фокусирующей магнитной системы

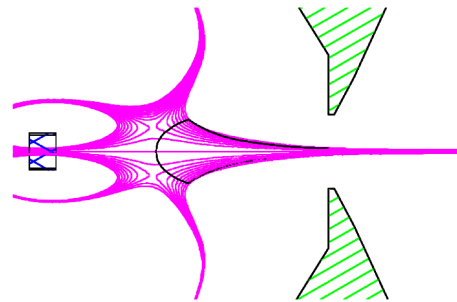


Рис. 3. Силовые линии магнитного поля в области электронной пушки

ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА MIS-1

Электронно-оптическая система электронно-лучевого источника многозарядных ионов MIS-1 обеспечивает плотность электронного пучка в ионной ловушке до $2 \cdot 10^3$ А/см² при токе 20 А и энергии электронов 40–50 кэВ. Длина ионной ловушки ~ 700 мм, а ее емкость $\sim 10^{12}$. Дрейфовая структура, внутри которой проходит электронный пучок,

Параметры сверхпроводящего соленоида

Максимальная индукция поля на оси дрейфовой структуры, Тл	3
Длина соленоида, мм	1020
Протяженность постоянного магнитного поля на оси дрейфовой структуры с погрешностью не более 5 %, мм	> 700
Диаметр «теплого» отверстия криостата, мм	275
Индуктивность соленоида, Гн	10
Максимальная энергия магнитного поля, кДж	450
Материал провода соленоида	NiTi + Cu

имеет внутренний диаметр электродов 6 мм и размещена вдоль оси вакуумной камеры диаметром 220 мм.

Соотношение диаметра дрейфовой структуры 6 мм и диаметра электронного пучка позволяет довести первеанс пучка в ионной ловушке до $2,5 \text{ мкА/В}^{3/2}$, что дополнительно увеличивает емкость ионной ловушки.

Для обеспечения ламинарности электронного пучка с данными параметрами была разработана фокусирующая магнитная система со сверхпроводящим соленоидом длиной 1 м (см. таблицу) и магнитопроводом, создающая фокусирующее магнитное поле величиной 3 Тл вдоль дрейфовой структуры источника MIS-1 на длине 700 мм. При этом обеспечивается необходимое согласование магнитных и электрических полей в области короткофокусной сферической электронной пушки, диаметр катода 34 мм, радиус кривизны катода 21,5 мм. Первеанс электронной пушки $p = 1,45 \text{ мкА/В}^{3/2}$. Распределение магнитного поля в электронном коллекторе обеспечивает высокий уровень рекуперации энергии электронного пучка $p \sim 30 \text{ мкА/В}^{3/2}$ при токе 20 А и энергии в области ионизации 50 кэВ, энергия пучка в электронном коллекторе 7,6 кэВ.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭОС И МАГНИТНОЙ ФОКУСИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

С целью оптимизации электронно-оптической системы MIS-1 в 2003 г. была проведена серия экспериментов по отработке ЭОС MIS-1 на существующей установке ИМИ-2 вертикальной конструкции. Было проведено подробное численное моделирование для согласования магнитных и электрических полей с учетом установки в EBIS ИМИ-2 электронной пушки ЭОС MIS-1. Радиус катода данной электронной пушки 17 мм, радиус кривизны катода 21,5 мм, первеанс $p = 1,45 \text{ мкА/В}^{3/2}$.

Для этого потребовалась существенная доработка магнитной диафрагмы полюса магнитопровода.

Для удовлетворительного согласования магнитных и электрических полей в области электронной пушки проведена доработка магнитной диафрагмы, находящейся в вакуумной камере и являющейся центральной частью верхнего полюса магнитопровода. Со стороны электронного коллектора магнитная диафрагма и полюс магнитопровода остались без изменений.

Соответственно, необходима доработка лишь верхней части дрейфовой структуры со стороны электронной пушки.

При стационарном фокусирующем магнитном поле $B = 0,9$ Тл электронный пучок с током 1,1 А при $p = 1,45$ мкА/ $B^{3/2}$ имеет радиус $\sim 0,6$ мм. Компрессия электронного пучка $\sim 10^3$. Токооседание на анод $0,6 \cdot 10^{-3}$ А.

ФОКУСИРУЮЩАЯ МАГНИТНАЯ СИСТЕМА СО СВЕРХПРОВОДЯЩИМ СОЛЕНОИДОМ

В установке MIS-1 многоразрядные ионы образуются при многократной последовательной ионизации атомов в ионной ловушке ионизирующим ламинарным электронным пучком с энергией 50 кэВ. Ток в пучке до 20 А, при этом обеспечена плотность тока в пучке $j \sim 2 \cdot 10^3$ А/см² на длине 700 мм.

Специальная структура и конструкция фокусирующей магнитной системы MIS-1, согласованная с электронно-лучевой системой, обеспечивает основное условие — ламинарность интенсивного электронного пучка на всей длине ЭОС, постоянство магнитного потока, проходящего через поперечное сечение электронного пучка от катода до коллектора. При этом обеспечивается необходимое согласование магнитных и электрических полей в области короткофокусной сферической электронной пушки, диаметр катода 34 мм, радиус кривизны катода 21,5 мм.

В кроссовере электронной пушки, где электрическая компрессия ~ 100 , электронный пучок замагничен полем 0,3 Тл, дальнейшая компрессия электронного пучка, не менее 10,

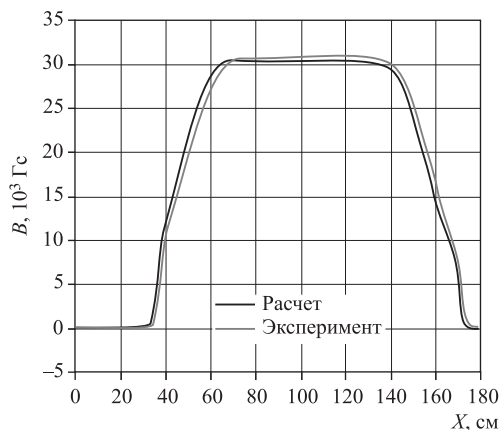


Рис. 4

обеспечивается фокусирующим магнитным полем до 3 Тл сверхпроводящего соленоида и магнитопроводом. В итоге должна быть получена компрессия электронного пучка 10^3 . Распределение магнитного поля в электронном коллекторе обеспечивает высокий уровень рекуперации энергии электронного пучка.

Фокусирующая сверхпроводящая магнитная система ионного источника MIS-1 имеет вертикальную конструкцию и состоит из сверхпроводящего соленоида длиной 1 м, размещенного в кристате, наружного магнитопровода, двух электромагнитных линз, расположенных в области электронной пушки, и коллектора электронов.

В центральной части верхнего и нижнего полюсов магнитопровода расположены магнитные диафрагмы специальной формы для обеспечения необходимого распределения магнитных полей в области электронной пушки и электронного коллектора.

Обмотка сверхпроводящего соленоида секционирована для того, чтобы обеспечить однородное фокусирующее поле 3 Тл на максимально возможной длине дрейфовой структуры 700 мм, что обеспечивает высокую емкость ионной ловушки до 10^{12} .

После «тренировки» сверхпроводящего соленоида было получено максимальное рабочее поле 3 Тл. Для полей внутри соленоида 1, 2 и 3 Тл было измерено распределение магнитного поля на оси магнитной системы. Измерения показали хорошее совпадение экспериментальных результатов с расчетными (рис. 4).

Для обеспечения высокого вакуума в области ионной ловушки $\sim 10^{-12}$ Торр использованы нераспыляемые геттерные пленки. Это обеспечит время ионизации тяжелых элементов до 2 с и более.

Система питания и управления позволяет регулировать время ионизации от 100 мкс до 2,5 с. Ток и энергия электронного пучка также регулируются в широком диапазоне (I от 1 до 20 А, E от 10 до 50 кэВ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Donetz E. D., Ilyushenko V. I., Alpert V. A.* // Intern. Conf. on Ion Sources, Saclay, 1969. P. 635.
2. *Abdulmanov V. G. et al.* Electron-Optic System of the Multicharge Ion Source (MIS-1) // Electron Beam Ion Sources and Their Applications: 8th Intern. Symp. Am. Inst. of Phys. 2001. P. 170–177.