

УДК 537.533

## Электронно-оптическая система источника многозарядных ионов MIS-1

*В. Г. Абдульманов*

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

*В. Л. Короткова, О. Ю. Масленников, П. В. Невский*

Государственное научно-производственное предприятие «Торий», Москва, Россия

*В. П. Рыбачек, В. К. Федяев*

Рязанская государственная радиотехническая академия, Россия

*Приведены результаты проектирования электронно-оптической системы (ЭОС) источника многозарядных ионов MIS-1, формирующей протяженный ~ 2-м электронный пучок мощностью 1 МВт. Увеличена до 1,5 м длина ионной ловушки источника с плотностью электронного пучка  $> 2 \cdot 10^3$  А/см<sup>2</sup>. В коллекторе предусмотрена рекуперация энергии электронного пучка.*

Электронно-оптическая система ЭОС разрабатываемого источника MIS-1 состоит из трех основных участков.

Первый участок включает в себя электронную пушку и область ввода электронного пучка в фокусирующее поле соленоида.

Вторым участком ЭОС является область дрейфа электронного пучка в фокусирующем поле соленоида, где в стационарном магнитном поле создается рабочая область ионного источника — ионная ловушка.

Третий участок — это вывод электронного пучка на коллектор с максимально возможной рекуперацией в целях снижения рассеиваемой на нем мощности и максимального снижения расходуемой на функционирование ЭОС энергии.

В электронно-лучевом ионном источнике (EBIS) емкость ионной ловушки равна числу электронов ионизирующего электронного пучка в ее объеме. Время достижения необходимого распределения зарядности ионов прямо пропорционально плотности электронного пучка [1].

В случае использования EBIS в современных ускорительных комплексах тяжелых ионов [2] необходимо обеспечить емкость ионной ловушки не менее  $10^{12}$  при плотности электронного пучка в ней  $> 10^3$  А/см<sup>2</sup>.

Наиболее эффективно эта задача решается при использовании ЭОС с двойной компрессией электронного пучка. В электронной пушке осуществляется электростатическая компрессия электронного пучка, на втором этапе компрессия обеспечивается нарастающим фокусирующим магнитным полем. Для этого создается такое распределение магнитного поля в области от катода до кроссовера, при котором силовые линии магнитного поля совпадают с траекториями электронов. За кроссовером магнитное поле нарастает и обеспечивает дополнительную плавную компрессию электронного пучка при условии сохранения его ламинарности.

### Электронная пушка

Результаты расчета электронной пушки с первансом  $1,45$  мкА/В<sup>3/2</sup> и с компрессией электронного пучка 190 приведены на рис. 1. Диаметр катода 34 мм, радиус кривизны составляет 21,5 мм, радиус пучка в кроссовере — 1,5 мм (ток электронного пучка 19 А при энергии пучка 56 кВ).

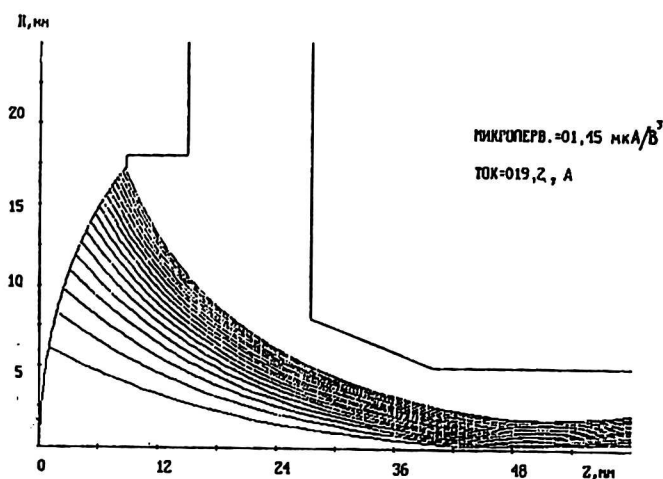


Рис. 1. Результаты расчета электронной пушки

Пушка формирует ламинарный электронный пучок и имеет простую технологичную форму фокусирующих электродов. В расчетах использовался аналитико-численный метод.

По результатам расчетов изготовлены катодные узлы на основе импрегнированных катодов.

Рабочая температура катодов не более 1100 °С.

### Расчет магнитной фокусирующей системы и электронного пучка

На рис. 2 представлена магнитная фокусирующая система источника MIS-1.

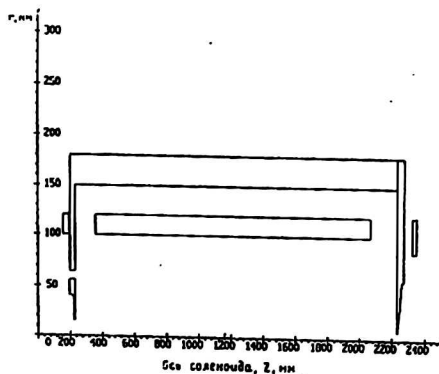


Рис. 2. Магнитная фокусирующая система

Для получения необходимой величины фокусирующего магнитного поля ~ 3 Тл. используется криогенный сверхпроводящий соленоид с замкнутым наружным магнитопроводом.

Магнитная фокусирующая система включает в себя также две электромагнитные линзы, расположенные снаружи полюсов соленоида, одна в области электронной пушки, другая — в области электронного коллектора.

В работах [3–6] было обеспечено стационарное фокусирующее магнитное поле и максимальная плотность электронного пучка на длине 1 м. Проведенное численное моделирование магнитной системы и ЭОС позволило сокра-

тить длину участков нарастания магнитного поля с 400 до 200 мм при условии сохранения ламинарности электронного пучка и получить его максимальную плотность на длине 1,5 м [7]. Это позволило отказаться от секционирования области соленоида, что повышает технологичность его изготовления.

Распределение магнитного поля на оси соленоида представлено на рис. 3. На рис. 4 показаны результаты расчета траекторий электронов непосредственно за кроссовером электронного пучка. Обеспечено сжатие электронного пучка нарастающим фокусирующим магнитным полем при сохранении его ламинарности. На рис. 5 приведены траектории электронов по всей длине фокусирующей системы. Энергия электронного пучка составляет 56 кВ, ток пучка 19,2 А, т. е. мощность в пучке  $\sim 1$  МВт. Протяженность участка электронного пучка с максимальной плотностью  $> 2 \cdot 10^3$  А/см<sup>2</sup>, на котором его радиус равен 0,5 мм, составляет 1,5 м. Длина ионной ловушки, соответственно, увеличивается до 1,5 м, а ее емкость составит  $2 \cdot 10^{12}$ .

Рис. 3. Распределение магнитного поля на оси соленоида

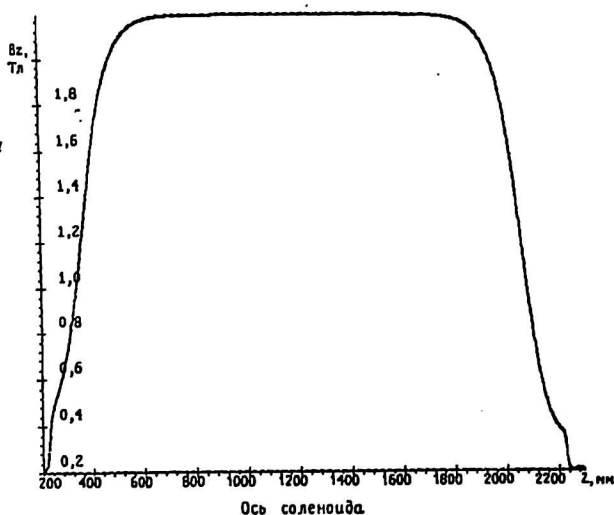
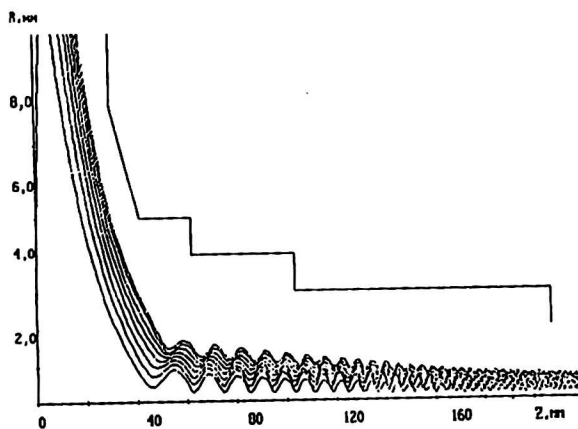


Рис. 4. Результаты расчета траекторий электронов



По всей длине ЭОС обеспечено согласование радиуса электронного пучка и радиуса трубки дрейфовой структуры ионного источника для исключения образования виртуального катода в пучке ввиду его высокой плотности.

В рабочей области (см. рис. 5), там, где электронный пучок имеет минимальный радиус 0,5 мм, радиус трубок дрейфа составляет 2 мм.

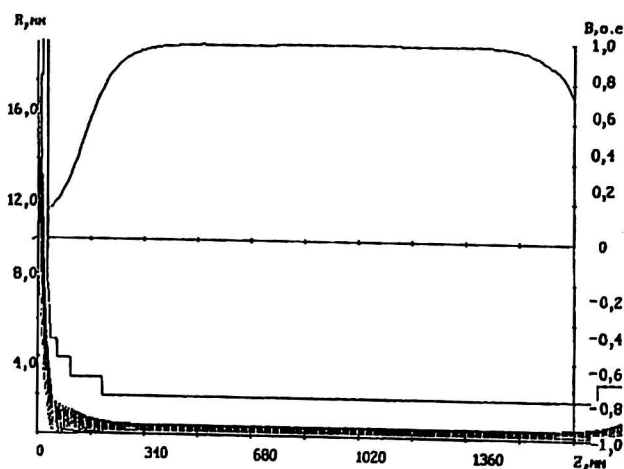


Рис. 5. Результаты расчета траекторий электронов на всей длине фокусирующего соленоида

Для образования эффективной ионной ловушки в области максимальной плотности электронного пучка необходимо повышать на 1–2 кВ потенциалы крайних участков дрейфовой структуры, тем самым создаются электростатические барьеры ионной ловушки. Для выпуска накопленных ионов барьер со стороны электронного коллектора снимается – его потенциал понижается до уровня равного или ниже потенциала дна ловушки.

Для повышения емкости ионной ловушки либо для снижения энергии электронного пучка и снижения энергопотребления при исходной емкости ионной ловушки целесообразно снизить энергию пучка в области его максимальной плотности. На рис. 6 представлены результаты расчетов ЭОС при торможении электронного пучка на всей длине рабочей области ионной ловушки с 1,45 до 2,5 мкА/В<sup>3/2</sup>.

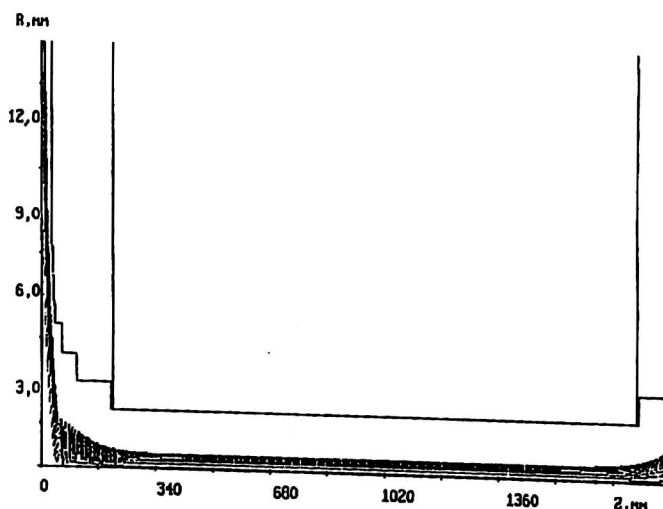
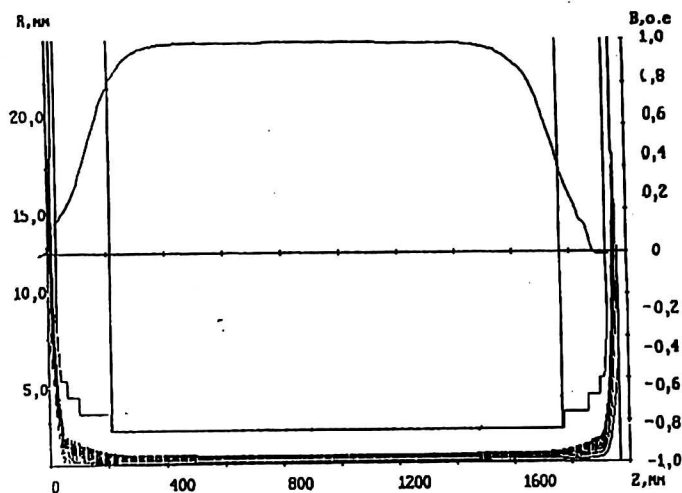


Рис. 6. Результаты расчета траекторий электронов при первичном 2,5 мкА/В<sup>3/2</sup>

Исследована возможность применения рекуперации на коллекторе для уменьшения рассеиваемой на нем мощности.

На рис. 7 показаны результаты расчета потока от катода до коллектора, потенциал которого снижен до 7 % от ускоряющего анодного напряжения. При этом коллектор выполнен в виде сферы, аналогичной сфере катода. Эти результаты свидетельствуют о возможности глубокой рекуперации в спроектированной электронно-оптической системе.

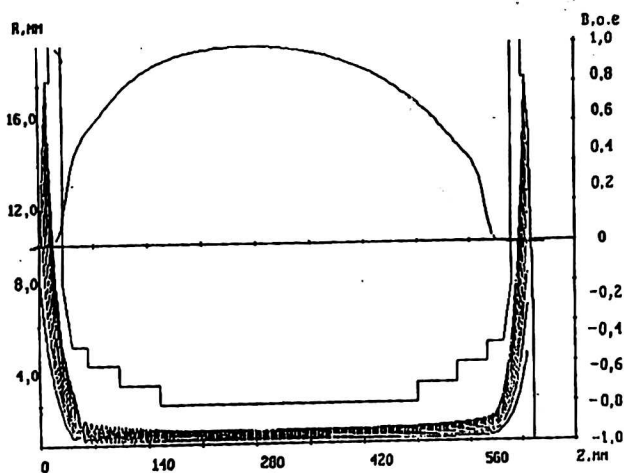
*Рис. 7. Результаты расчета потока от катода до коллектора*



Экспериментальное моделирование разработанной ЭОС возможно на существующем в Институте ядерной физики электронно-лучевом источнике ионов ИМИ-2 [8-11].

Проведенные расчеты (рис. 8) показали полную совместимость имеющихся систем установки ИМИ-2 с параметрами разработанной ЭОС MIS-1, вплоть до энергии электронного пучка 20 кВ.

*Рис. 8. Результаты расчетов по адаптации ЭОС MIS-1 на ИМИ-2*



## Литература

1. Donetz E. D., Ilyushenko V. I. and Alpert V. A.//Intern. Conf. On Ion sources, Saclay, 1969. P. 635.
2. Haseroth H. and Prelec K.//Physica Scripta. 1997. V. T71. P. 23-27.
3. Abdulmanov V. G., Nevsky P. V. EBIS MIS-1 Project.: Symposium "EBIS-7", 1997, Germany.
4. Абдулманов В. Г., Короткова В. А., Невский П. В., Рыбачек В. П., Федяев В. К. Электронно-оптическая система со сходимостью 1000, формирующая мощный протяженный поток малого диаметра //В кн.: Третий Всероссийский семинар «Проблемы теоретической и прикладной электронной оптики»: Тез. докл.: - М., 1998. С. 30-31.
5. Абдулманов В. Г., Короткова В. А., Невский П. В., Рыбачек В. П., Федяев В. К. Электронно-оптическая система со сходимостью 1000, формирующая мощный протяженный поток малого диаметра//Прикладная физика. 1998. № 3-4. С. 111-114.
6. Abdulmanov V. G., Nevsky P. V., Rybachek V. P., Fedyaev V. K. Simulation of the system of the powerful ionizing beam formation and transportation//The 3th International Symposium. Proceedings. Application of the Conversion Research Results for International Cooperation. SIBCONVERS' 99, May 18-20, 1999, Tomsk, Russia. P. 540-542.
7. Абдулманов В. Г., Короткова В. А., Масленников О. Ю., Невский П. В., Рыбачек В. П., Федяев В. К. Электронно-оптическая система источника многозарядных ионов MIS-1//В кн.: Четвертый Всероссийский семинар «Проблемы теоретической и прикладной электронной оптики»: Тез. докл. - М. 1999. С. 77-78.
8. Abdulmanov V. G. In Proceeding 5-th International Symposium on Electron Beam Ion Sources and Their Applications, Eds. E. D. Donets and I. P. Yudin, JINR, Dubna, 1992. P. 71.
9. Abdulmanov V. G. Electron Beam Ion Source IMI-2//List of expected Lectures and contribution to the 6th International Symposium on Electron Beam Ion Sources and their Application, Stockholm University, 1994.
10. Abdulmanov V. G., Bykov P. V., Dement'ev Ye. N., Miginskaya Ye. G., Mironenko L. A., Pirogov O. V., Tomilov V. P., Tsukanov V. M. Experiments on IMI-2//Proceedings for Symposium EBIS-7. Germany, 1997.
11. Абдулманов В. Г., Дементьев Е. Н., Мигинская Е. Г., Мироненко Л. А., Пирогов О. В., Томилов В. П., Цуканов В. М. Электронно-лучевой источник многозарядных ионов IMI-2//В кн.: Четвертый Всероссийский семинар «Проблемы теоретической и прикладной электронной оптики»: Тез. докл. - М., 1999. С. 76-77.

## Election-optical system of multicharged ions, MIS-1

V. G. Abdulmanov,

The Budker's Institute for Nuclear Physics SB RAS, Novosibirck, Russia

V. L. Korotkova, O. Yu. Maslennikov, P. V. Nevski,  
State Research and Production Enterprise, Moscow, Russia

V. P. Rybachek, V. K. Fedyaev  
Ryazan Radio-Engineering Academy, Russia

*The results of designing election-optical of a radiant of multicharged ions MIS-1 formative extended (~ 2 m) electron beam by power 1 Mw are given. Ion trap length of radiant about electron beam density of  $> 2 \cdot 10^3$  A/cm<sup>3</sup> enlarged up to 1,5 m. In collector the recuperation of electron beam energy is provided.*