

УДК 621.384.6

КАНАЛЫ ВЫВОДА ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ РЕЦИРКУЛЯТОРА SALO НА ФИЗИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

В.Б. Ганенко, И.С. Гук, А.Н. Довбня, С.Г. Кононенко, А.С. Тарасенко

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»

ул. Академическая, 1, Харьков, 61108., Украина,

E-mail: ksg@kipt.kharkov.ua

Поступила в редакцию 10 июля 2007 г.

Приведено расположение планируемых экспериментальных физических установок, использующих пучки рециркулятора SALO - базовой установки ИЯФиВЭ ННЦ ХФТИ. Исходя из предложенной программы исследований, сформулированы требования к параметрам пучка, выводимого на экспериментальные установки. Выбраны магнитооптические структуры (МОС) каналов вывода пучка из рециркулятора, обеспечивающие требуемые параметры пучка на физических мишенях. Приведены рассчитанные для этих каналов огибающие пучка и исследовано влияние погрешности ввода пучка в пучковые линии на отклонение его от идеальной траектории.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: рециркулятор, ускоритель электронов, магнит, квадруполь, корректор.

ВВЕДЕНИЕ

Базовая установка ИЯФиВЭ ННЦ ХФТИ – электронный рециркулятор SALO на максимальную энергию 730 МэВ проектируется в первую очередь как установка для фундаментальных исследований в области ядерной физики [1].

Фундаментальные исследования в области ядерной физики являются актуальными, поскольку связаны с поисками ответов на фундаментальные вопросы (структура и эволюция материи, будущее окружающего нас мира) и с возможностью практического использования результатов исследований и базой для этих исследований должна быть ускорительная установка нового поколения.

Пучки электронов и фотонов (электромагнитные (ЭМ) зонды) являются одними из наиболее подходящих инструментов для таких исследований и имеют определенные преимущества перед другими методами исследований, например, с использованием адронных пучков. Во-первых, благодаря хорошо разработанной теории ЭМ взаимодействия, взаимодействие зонда с системой хорошо описывается квантовой электродинамикой, и, во-вторых, благодаря относительной слабости ЭМ взаимодействия можно зондировать внутренние области адронов и ядер не возбуждая сильно исследуемую систему.

В проектируемом варианте установка обеспечит возможность проводить исследования как по фундаментальным, так и прикладным программам на мировом уровне. Необходимым условием для этого является высокая точность результатов, которая будет обеспечиваться высоким качеством выводимых пучков, и широкий диапазон исследований, который будет достигаться достаточным количеством пучковых каналов.

Предусматривается возможность создания как неполяризованных, так и поляризованных пучков электронов и фотонов, которые позволят выполнять эксперименты с электромагнитными зондами в промежуточном диапазоне энергии [2] на уровне современных требований, а также обеспечить исследования по взаимодействию электронов с периодическими структурами. Перспективным направлением исследований на установке является изучение взаимодействия излучения с веществом и создание новых интенсивных источников гамма излучения для фундаментальных и прикладных исследований [2].

Расположение будущего ускорителя в мишенном зале ускорительного комплекса ЛУ2000 [1] позволяет использовать как существующие залы для физических исследований, так и создать несколько новых вариантов каналов для использования электронного пучка. Схема расположения ускорительной установки SALO и предполагаемых пучковых линий проекта показаны на рис. 1. В зале магнитных спектрометров СП-103 планируется создать три пучковые линии (см. рис. 1): высоко-энергетичная фотонная линия – А, первая пучковая линия для экспериментов с мечеными фотонами (как неполяризованными, так линейно и циркулярно поляризованными) в диапазоне энергии вплоть до 730 МэВ; электронная линия – С, вторая пучковая линия для экспериментов с поляризованными и неполяризованными электронами с той же максимальной энергией; третья пучковая линия для экспериментов по взаимодействию электронов и излучения с веществом (В). Четвертую пучковую линию предполагается создать в линзовом коридоре ускорителя ЛУ2000 (см. рис.1). Она предназначена для проведения экспериментов с мечеными фотонами (как неполяризованными, так и поляризованными линейно и циркулярно) с максимальной энергией до 490 МэВ (низкоэнергетичная фотонная линия – D).

Пятая пучковая линия может быть размещена в зале перезагрузки ускорителя ЛУ2000. Она может быть использована для проведения экспериментов с мечеными фотонами с максимальной энергией до 490 МэВ (фотонная линия Е). Для вывода излучения из лазера на свободных электронах, расположенного в пустом прямолинейном промежутке рециркулятора, будет использоваться линия FEL.

К пучку электронов на линиях А, В, С, D, Е предъявляются следующие основные требования:

- энергия $E=50\div 730$ МэВ;
- ток до 30 мкА;
- расходимость пучка в районе фотонной мишени - 5×10^{-5} рад;
- размер пучка на мишени $\leq 0,2$ мм;
- гало пучка $<10^{-5}$.

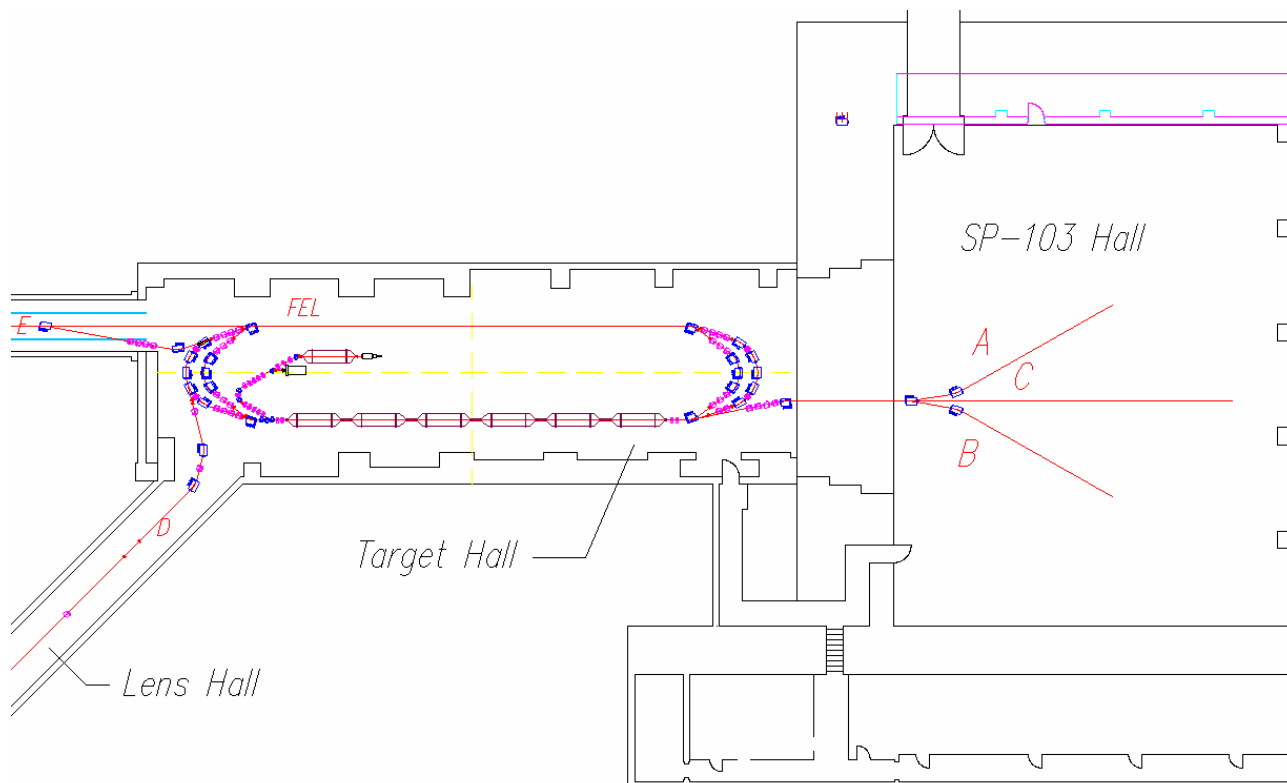


Рис. 1. Линии для экспериментов с пучками на рециркуляторе SALO

Целью настоящей работы являлся выбор и оптимизация структуры МОС каналов для получения необходимых для проведения экспериментов параметров пучка в местах расположения мишеней.

Огибающие пучка для каналов А, В, С, D, Е, приведенные ниже, рассчитаны для следующих параметров пучка:

- энергия инжекции $E=9,5$ МэВ;
- размеры и расходимость инжектируемого пучка $\Delta_{x,y}=0,2$ см, $\Delta'_{x,y}=0,03$ мрад;
- энергия выводимого пучка $E=730$ МэВ (каналы А, В, С) и 490 МэВ для каналов D, Е.

Расчёты выполнялись путем численного моделирования динамики частиц с использованием программы TRANSPORT [3].

ЛИНИИ А, В (Photon Line)

Указанным выше требованиям удовлетворяет магнито-оптическая система (МОС) линий А, В, приведенная на рис. 2.



Рис. 2. Магнитооптическая система линий А, В и С.

Обозначения на рисунке: М – дипольные магниты; Л – квадрупольные линзы; К – корректоры.

Вывод пучка на мишень с требуемыми параметрами осуществляется с помощью квадрупольных линз А2Л1-А2Л4, конструкция которых аналогична основным используемым в кольце квадрупольям [4], четырёх

дипольных магнитов АЗМ1-АЗМ3, ВЗМ1, идентичных дипольным магнитам второго кольца рециркулятора [4]. Расположение и сила линз выбирались таким образом, чтобы обеспечить: 1) ахроматичность пучковой линии в районе мишени; 2) сделать пучок на выходе пучковой линии слабо расходящимся для того, чтобы его размеры не были критичны к месту расположения мишени.

Значения матричных элементов R16 и R26, определяющих зависимость размеров и расходимости пучка от разброса по энергии, полученные путём оптимизации структуры в программе TRANSPORT [3], составили соответственно 0,08167; 0,0636 (для линии А); -0,06907; -0,07077 (для линии В). На рис. 3 приведена огибающая электронного пучка вдоль линий А и В. Для линии В положение магнита ВЗМ1 совпадает с положением магнита АЗМ3 на рис. 3.

Расстояние S отсчитывается от выхода магнита 12М1 в метрах. Точка F на всех рисунках соответствует положению мишени.

ЛИНИЯ С

Линия С предназначена для экспериментов с пучками поляризованных электронов и с пучками фотонов малой и высокой интенсивности. Может использоваться для размещения лазера на свободных электронах на энергию 730 МэВ. МОС линии С изображена на рис. 2.

Формирование пучка и вывод на мишень с требуемыми параметрами осуществляется с помощью квадрупольных линз А2Л1-А2Л4 и одного дипольного магнита АЗМ1. Значения матричных элементов R16 и R26 составили 0,00124; -0,00638 для оптимизированного варианта силы линз.

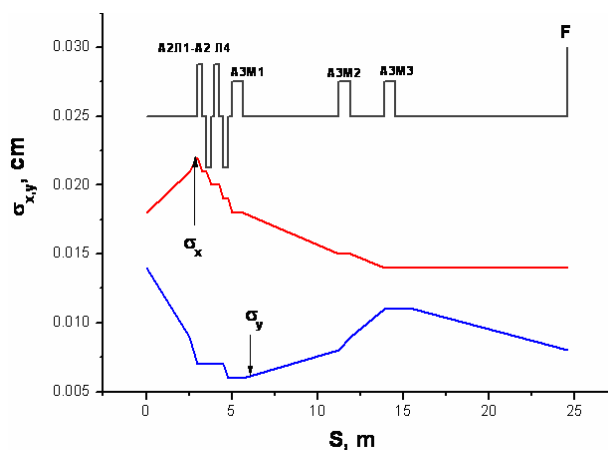


Рис. 3. Структура каналов А, В и огибающие пучка

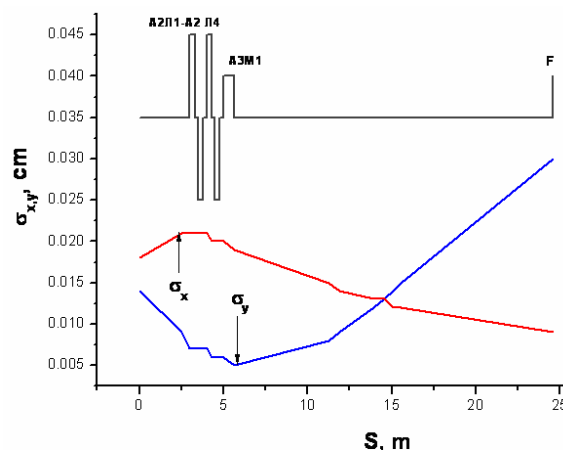


Рис. 4. Структура канала С и огибающие пучка

На рис. 4 приведена огибающая электронного пучка вдоль линии С. Расстояние S отсчитывается от выхода магнита 12М1.

ЛИНИЯ D (Low Energy Photon Line)

Линия D предназначена для экспериментов с пучками фотонов малой и средней интенсивности, а также с пучками электронов с энергией до 490 МэВ. МОС линии D показана на рис. 5.

Вывод пучка на мишень с требуемыми параметрами осуществляется с помощью квадрупольных линз 22Л11, 22Л12 и 23Л3 второго кольца рециркулятора, квадрупольных линз D2Л1÷D2Л5 пучковой линии D (см. также рис. 1 и рис. 6) и двух дипольных магнитов DЗМ1, DЗМ2, идентичных магнитам второго кольца рециркулятора. Расположение и сила линз выбирались таким образом, чтобы сделать пучок на выходе пучковой линии слабо расходящимся для того, чтобы его размеры не были критичны к месту расположения мишени. Значения матричных элементов R16 и R26 составили соответственно -0,01905 и 0,03457.

На рис. 6 приведена огибающая электронного пучка вдоль линии D. Как видно из рисунка, изменение положения мишени более, чем на 20 м существенно не влияет на размеры пучка на мишени.

Расстояние S отсчитывается от выхода магнита 23М8.

ЛИНИЯ E (Low Energy Photon Line)

Линия E предназначена для экспериментов с пучками фотонов малой и средней интенсивности, а также с пучками электронов с энергией до 490 МэВ. На рис. 5 приведена магнитооптическая система линии E.

Вывод пучка на мишень осуществляется с помощью квадрупольных линз 22Л9 - 22Л12 второго кольца рециркулятора и двух дипольных магнитов ЕЗМ1, ЕЗМ2, идентичных им, а также с помощью квадрупольных линз Е2Л1 – Е2Л4. Расположение и сила линз выбирались таким образом, чтобы обеспечить ахроматичность

пучковой линии в районе мишени и сделать пучок на выходе пучковой линии слабо расходящимся. Значения матричных элементов R16 и R26 составили соответственно -0,01905 и 0,03457. Положение магнита E3M2 может быть изменено без существенного изменения качества пучка. На рис. 7 приведена огибающая электронного пучка вдоль линии E. Расстояние S отсчитывается от входа магнита 12M6.

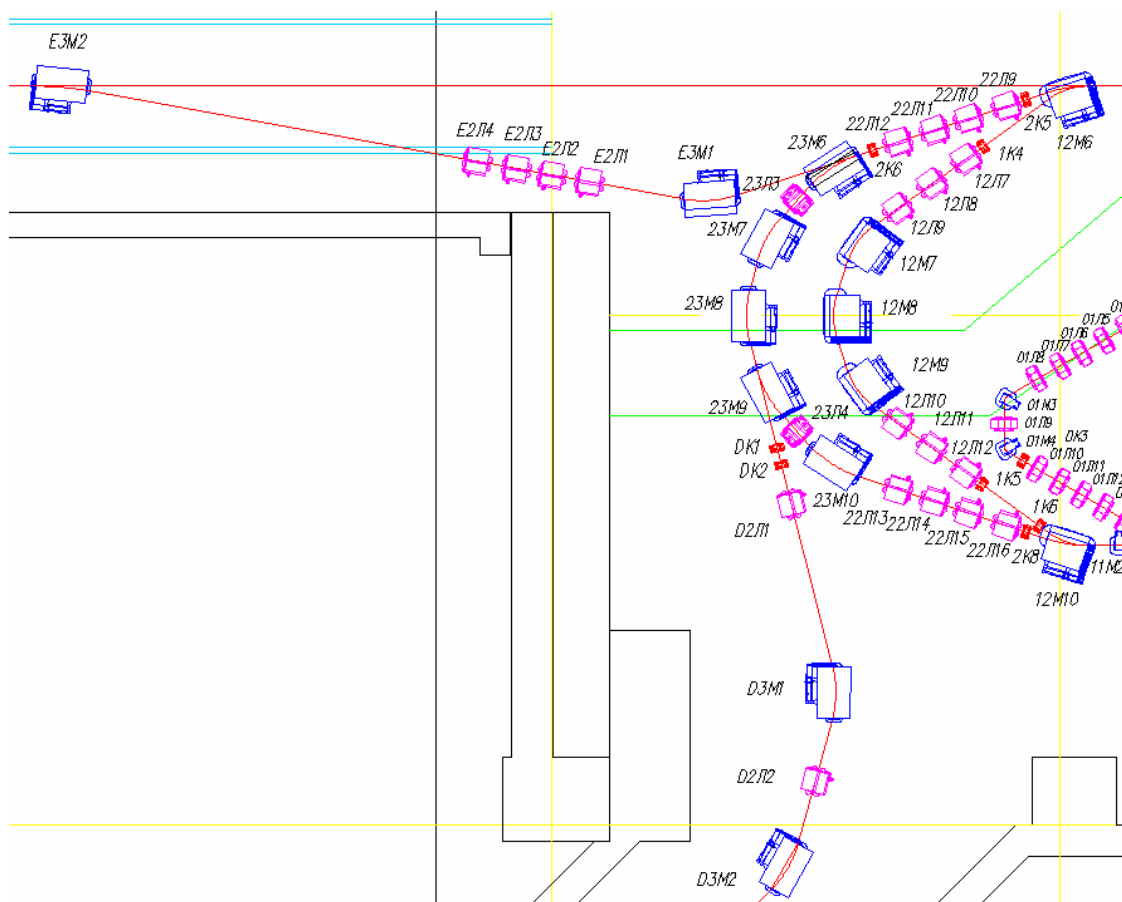


Рис. 5. Расположение электромагнитного оборудования на линиях D и E.

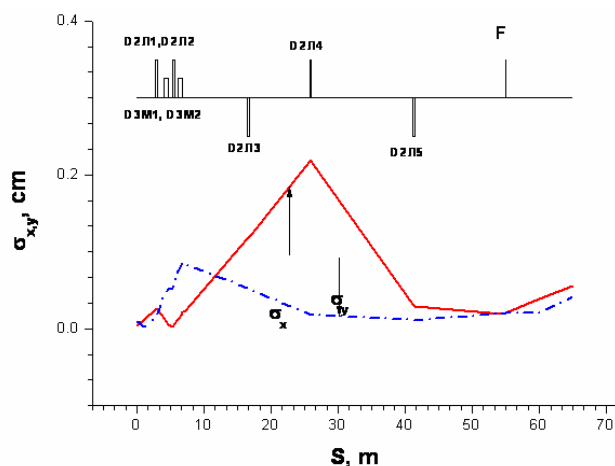


Рис. 6. Структура и огибающие пучка на канале D

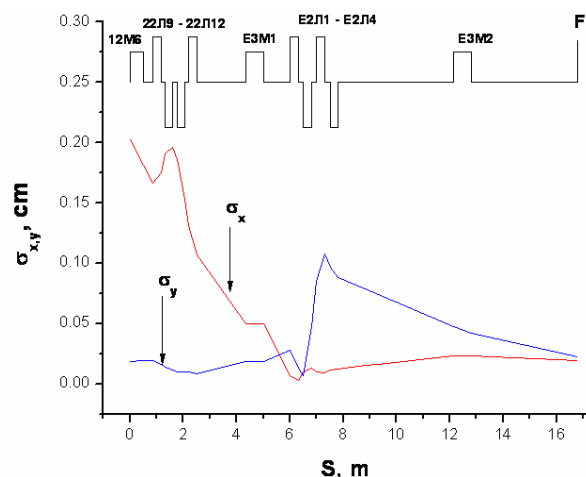


Рис. 7. Структура и огибающие пучка на канале E

ЛИНИЯ FEL (Free Electron Laser Line)

Прецизионные характеристики электронного пучка в рециркуляторе позволяют использовать его для генерации излучения в инфракрасном, видимом и вакуумном ультрафиолетовом диапазоне длин волн [1]. Для размещения ондулятора, длина которого может превышать десять метров, выбран свободный длинный промежуток рециркулятора (линия FEL). Эта линия предназначена для экспериментов по исследованию условий генерации и характеристик излучения лазера на свободных электронах и удобна тем, что

эксперименты с излучением могут проводиться параллельно с исследованиями по ядерной физике на каналах А, В, С и D. В случае работы только на программу лазера на свободных электронах, очистка излучения от электронного пучка будет осуществляться с помощью магнитов второго кольца рециркуляции. Излучение будет выводиться в зал перегрузки (см. рис. 1, здесь же расположена линия E). Для того, чтобы вакуумные системы линий E и FEL были отделёнными, возможно, положение магнита E3M2 при окончательной компоновке каналов на рециркуляторе целесообразно сместить, сохранив при этом все требования к пучку на мишенях. Линия FEL будет содержать лишь оптические элементы, предназначенные для фокусировки, отражения и диспергирования излучения.

Для работы в более коротком диапазоне длин волн ондулятор лазера может быть размещён на линии С, где энергия пучка электронов будет максимальной. Условия фокусировки электронного пучка при этом необходимо изменить.

МАГНИТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Магнитные элементы, используемые в МОС пучковых линий А, В, С, D, E, имеют следующие параметры: Дипольные магниты-А3М1-А3М3, В3М1, D3М1, D3М2, E3М1, E3М2:

- длина дуги поворота, м 0,65748
- напряженность магнитного поля, кгаусс 4,46-12,53
- апертура, см 2,5×12

Квадрупольные линзы А2Л1-А2Л4, D2Л1- D2Л5, E2Л1-E2Л4:

- эффективная длина, см 30
- диаметр апертуры, см 5
- максимальный градиент, кгаусс/см 1,2

ДОПУСКИ И КОРРЕКЦИЯ

Было проведено исследование влияния погрешности ввода пучка в пучковые линии А, В на отклонение пучка от идеальной траектории. Установлено, что погрешность в начальных условиях $\Delta_{x,y}=\pm 0,5$ мм и $\Delta'_{x,y}=\pm 0,4$ мрад на выходе из магнита 12М1 не приводит к отклонениям центральной траектории пучка от идеальной большим, чем ± 1 см по каждой степени свободы на мишени. Аналогичные данные получены и для других пучковых линий С, D, E. Система коррекции, разработанная для рециркулятора, сможет скомпенсировать эти отклонения и обеспечить проводку пучка по линиям А, В, С, D, E на мишени.

ВЫВОДЫ

Приведенные выше магнитооптические характеристики пучковых линий удовлетворяют требованиям планируемых на них физических экспериментов.

Требования к точности ввода пучка в каналы являются вполне выполнимыми и могут быть обеспечены разработанной для рециркулятора системой коррекции положения пучка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arkatov Yu.M., Dovbnya A.N., Glamazdin A.V., Guk I.S., Kononenko S.G., M. van der Weil, J.I.M. Botman, Peev F.A., Tarasenko A.S. "SALO" project, National Science Center Kharkov Institute of Physics, Technology, Kharkiv, 2005, 104 p.
2. Буки А.Ю., Ганенко В.Б., Корчин А.Ю., Котляр В.В., Маслов Н.И., Трутень В.И., Фомин С.П., Шебеко А.В., Шевченко Н.Г., Шульга Н.Ф. Фундаментальные и прикладные исследования на линейном ускорителе рециркуляторе электронов с энергией 730 МэВ (Проект SALO), часть 1, ННЦ ХФТИ, Харьков, 2006, 116 с.
3. Karl L. Brown, D. C. Carey, Ch. Iselin, and F. Rothacker TRANSPORT - A Computer Program for Designing Charged Particle Beam Transport Systems. CERN 73-16, revised as CERN 80-4, CERN, 1980.
4. Guk I.S., Dovbnya A.N., Kononenko S.G., Peev F.A., Tarasenko A.S., M. van der Wiel, J.I.M. Botman Isochronous Magneto-optical Structure of Recirculator SALO //Proc. of EPAC, Edinburg, Scotland, 26-30 June 2006. - P. 2035-2037.

THE ELECTRON BEAM LINES FROM SALO RECIRCULATOR TO PHYSICAL INSTALLATION

A.N. Dovbnya, V.B. Ganenko, I.S. Guk, S.G. Kononenko, A.S. Tarasenko

National Science Centre "Kharkov Institute of Physics and Technology"

1 Academicheskaya St., Kharkov, 61108, Ukraine

The arrangement of designing physical installations, which will use the beams of SALO recirculator - the base facility of INF&HE NSC KIPT, is shown. The requirements to parameters of beam extracted into experimental setups, which follow from the offered research program, are formulated. Magneto-optical structures of particle extraction channels, which provide required parameters of the beam on physical targets, are chosen. The calculated for these channels the beam envelopes are resulted and influence of inaccuracy of the beam input into the beam lines on its deviation from ideal trajectory is investigated.

KEY WORDS: recirculator, electron accelerator, magnet, quadrupole, corrector.