

УДК 537.533.31

ИНЖЕКЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ СИБИРСКОГО КОЛЬЦЕВОГО ИСТОЧНИКА ФОТОНОВ

© 2020 г. С. М. Гуров^{а, *}, В. Н. Волков^а, К. В. Золотарев^а, А. Е. Левичев^а

^аИнститут ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН),
Новосибирск, 630090 Россия

*e-mail: S.M.Gurov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 28.10.2019 г.

После доработки 14.12.2019 г.

Принята к публикации 17.12.2019 г.

Сибирский кольцевой источник фотонов (СКИФ), разрабатываемый в Новосибирске, – это новый источник синхротронного излучения четвертого поколения на 3 ГэВ и периметром 480 м. Для получения ярких пучков синхротронного излучения СКИФ должен иметь соответствующую инжекционную систему, которая подготавливает интенсивные пучки электронов. В статье описывается предлагаемая конфигурация инжекционной системы и ее параметры. Сгустки электронов формируются в пушке на основе СВЧ-резонатора, после этого ускоряются в линейном ускорителе до 200 МэВ, а затем ускоряются до 3 ГэВ в бустерном синхротроне с периметром 160 м. Инжекционный комплекс будет работать с частотой 1 Гц и будет способен накачать основное кольцо током от 0 до 400 мА за одну минуту.

Ключевые слова: источник синхротронного излучения, инжекционная система, бустерный синхротрон, линейный ускоритель.

DOI: 10.31857/S1028096020060072

ВВЕДЕНИЕ

Синхротронное излучение (СИ) широко используется для научных исследований и разработок. [1–3]. В настоящее время в мире действует более полусотни источников СИ. Из них около двадцати являются источниками СИ третьего поколения. Недавно в Швеции был запущен источник СИ 4-го поколения MAX-IV. Идет создание источника СИ 4-го поколения SIRIUS в Бразилии и ведутся работы по модернизации до 4-го поколения существующего источника СИ ESRF во Франции. Сейчас на многих других источниках СИ в мире готовятся проекты по модернизации. В России обсуждается проект строительства трех источников СИ 4-го поколения: один на 6 ГэВ в Протвино и два источника СИ на 3 ГэВ в Новосибирске и Владивостоке.

Для современного источника СИ требуется надежный инжекционный комплекс, снабжающий пучками электронов основное кольцо. В данной работе предлагается создать инжекционный комплекс на основе линейного ускорителя на 200 МэВ и бустерного синхротрона на полную энергию.

ТРЕБОВАНИЯ К ИНЖЕКЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Накопитель электронов будет снабжаться сгустками электронов из инжекционного комплекса, состоящего из линейного ускорителя (далее линак) на 200 МэВ и бустерного синхротрона (далее бустер), разгоняющий сгустки электронов с 200 МэВ до 3 ГэВ. Бустер предлагается создать на подобии бустера, который недавно был спроектирован и изготовлен ИЯФ для источника СИ NSLS-II в Брукхейвенской национальной лаборатории (США) [4]. Линак на 200 МэВ будет создан на основе разработок и технологий ИЯФ, примененных недавно при создании инжекционного комплекса ВЭПП-5, который включает в себя два линака (один на 300 МэВ, а другой на 500 МэВ).

Такой инжекционный комплекс полностью удовлетворит потребность накопительного кольца в сгустках электронов, а имеющиеся разработки и технологии позволят создать и запустить источник СИ СКИФ 4-го поколения в течение пяти лет.

Инжекционный комплекс состоит из:

- а) линейного ускорителя на 200 МэВ;
- б) транспортного канала из линейного ускорителя в бустер;

Таблица 1. Основные параметры инжекционного комплекса

Энергия инжекции в основное кольцо	3 ГэВ
Максимальная энергия инжекции	3.15 ГэВ
Частота инжекции в накопитель	1 Гц
Время между сгустками	5.6 нс
Количество сгустков электронов в поезде	до 55
Заряд в одном сгустке	до 0.24 нКл
Максимальный заряд в поезде	13 нКл
Время заполнения накопителя электронов от 0 до 400 мА	Не более 1 мин
Эффективность транспорта заряда от пушки до накопителя	Не менее 90%
Горизонтальный эмиттанс при 3ГэВ	<40 нм · рад
Разброс по энергии	<0.1%
Время незапланированных остановок в год	Не более 0.5%

Таблица 2. Основные параметры линейного ускорителя

Номинальная энергия электронов	200 МэВ
Максимальная энергия	210 МэВ
Частота выстрелов	1 Гц
Длина последовательностей сгустков	до 310 нс
Время между сгустками	5.6 нс
Количество сгустков электронов в поезде	до 55
Максимальный заряд в поезде	15 нКл
Заряд в одном сгустке	0.27 нКл
Геометрический эмиттанс при 200 МэВ	150 нм · рад
Разброс по энергии на 200 МэВ	Не более 1% (средне квадратичное)
Время незапланированных остановок в год	Не более 0.5%

в) бустера на полную энергию;

г) транспортного канала из бустера в накопитель электронов.

Основные параметры инжекционного комплекса приведены в табл. 1.

ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ

Линейный ускоритель предназначен для формирования последовательности сгустков электронов требуемой интенсивности и требуемой модуляции с энергией 200 МэВ. Требования на интенсивность и модуляцию зависят от того, в каких режимах и в каких модах будет работать накопитель электронов.

Пользователям источника СИ СКИФ для своих исследований могут потребоваться различные моды заполнения накопителя электронов сгустками. Основной модой на современных источниках СИ является заполнение всех возможных сепаратрис накопителя электронов. В случае СКИФ в основной моде в накопителе электронов будут вращаться 255 сгустков электронов через 5.6 нс. Однако, в зависимости от задач, стоящих перед исследователями, использующими СИ, могут потребоваться и другие моды [5].

Чтобы иметь возможность предоставить пользователям любую моду требуется, чтобы линак мог выдавать последовательность сгустков с заданным распределением заряда в каждом сгустке. Основные параметры проектируемого линака приведены в табл. 2.

Для выполнения требований, предъявляемых к линаку, предлагается создать линак по схеме, показанной на рис. 1.

Основные элементы и их краткие описания приводятся в табл. 3.

Источник электронов предполагается сконструировать на основе СВЧ-резонатора с сеточно-управляемым термокатодом. В этом случае возможно обеспечить модуляцию тока инжекции с частотой около 178.5 МГц, используя резонатор на данную частоту, так же как это было реализовано на лазере на свободных электронах в Новосибирске [6].

Предускоритель-группирователь, разработанный в ИЯФ СО РАН совместно с Институтом химической кинетики и горения СО РАН [7], в качестве одного из вариантов предлагается выполнить на основе ускоряющей структуры с параллельной связью с частотой 2856 МГц.

Основное ускорение до 200 МэВ будет происходить в ускоряющих структурах, созданных на основе диафрагмированного волновода. Такие ускоряющие структуры, работающие в режиме бегущей вол-

ны с постоянным импедансом, были давно разработаны в ИЯФ СО РАН и успешно используются на инжекционном комплексе ВЭПП-5 [8]. Предполагается использовать секции длиной 3 метра с модой колебания $2\pi/3$ и клистроны в качестве источников СВЧ-мощности.

БУСТЕРНЫЙ СИНХРОТРОН

Бустерный синхротрон (далее бустер) предназначен для ускорения пучка электронов до проектной энергии накопителя электронов (3 ГэВ).

Бустер планируется создать, используя опыт, полученный в ИЯФ [9]. В 2010 г. в результате победы в открытом международном тендере ИЯФ СО РАН получил контракт на проектирование, изготовление и запуск под ключ бустерного синхротрона для источника СИ NSLS-II в Брукхейвенской национальной лаборатории (США). Контракт на создание бустера под ключ включал: магнито-вакуумную систему, циклические источники питания, участки впуска и выпуска вместе с импульсными источниками питания, всю диагностику и управление, интегрированное в управление всего источника СИ NSLS-II. Основные параметры бустера NSLS-II приведены в табл. 4.

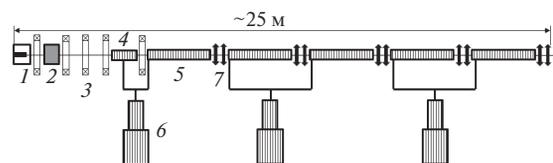


Рис. 1. Схема линейного ускорителя на 200 МэВ: 1 – СВЧ-пушка, 2 – группирователь третьей гармоники, 3 – соленоиды, 4 – предускоритель-группирователь, 5 – регулярная ускоряющая структура, 6 – клистрон 50 МВт, 7 – дублет квадрупольных линз.

Подобный бустер будет наилучшим образом отвечать требованиям проекта СКИФ и потребует минимальных корректировок на этапе проектирования. Это позволит приступить к его производству на раннем этапе, высвободив разработчиков и конструкторов для работы с другими частями комплекса СКИФ. Что позволит создать СКИФ в сжатые сроки (5 лет), в отличие от других источников СИ в мире, которые, как правило, изготавливаются за 7–10 лет. Изменения коснутся только ВЧ-резонаторов, которые должны работать на той же частоте, что и резонаторы накопителя электронов. ВЧ-система накопителя СКИФ предполагается создать для работы на частоте 357 МГц, в отличие от частоты 500 МГц, ис-

Таблица 3. Основные элементы линейного ускорителя

Название	Описание	Кол-во
Источник электронов	СВЧ-пушка на основе термо-катодного сеточного узла, частота 178 МГц	1
Группирующий резонатор 1	Резонатор с частотой 534 МГц	1
Группирователь-предускоритель	Структура с параллельной связью с частотой 2856 МГц	1
Ускоряющая структура	Частота 2856 МГц, длина 3 м, структура на бегущей волне с видом колебания $2\pi/3$	5
Источник мощности резонатора СВЧ пушки	Частота 178 МГц, мощность 1 МВт	1
Модулятор источника электронов		1
Источник СВЧ-мощности резонатора группирователя	Частота 534 МГц, мощность 10 кВт	1
Клистрон	Частота 2856 МГц, мощность 50 МВт	3
Предусилитель мощности для клистрона	Частота 2856, мощность 500 Вт	3
Модулятор клистрона	350 кВ высокое напряжение, 120 МВт импульсная мощность	3
Термостабилизация	~50 кВт	1
Соленоидальные фокусирующие элементы	Соленоид с максимальным полем 4 Гс	5
Квадрупольные линзы	Линзы регулярных ускоряющих структур	10

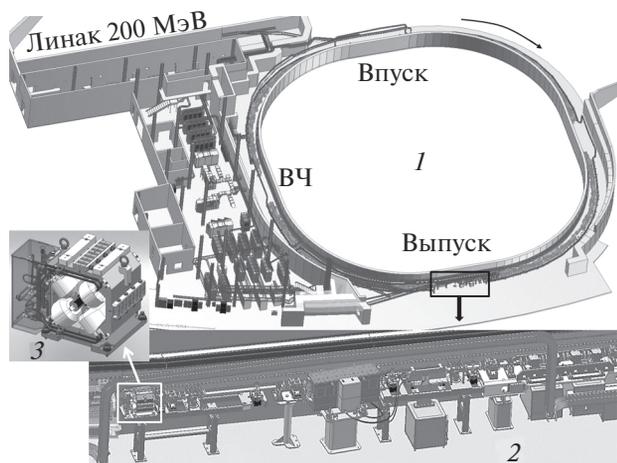


Рис. 2. 3D-модель инжекционного комплекса: 1 – бустерный синхротрон периметром 158 м, 2 – увеличенный участок выпуска пучка из бустера, 3 – один из 24 квадрупольных магнитов.

Таблица 4. Основные параметры бустера NSLS-II согласно конкурсной спецификации

Периметр кольца	158 м
Энергия электронов на впуске	200 МэВ
Энергия электронов на выпуске	3 ГэВ
Частота работы	1 Гц
Частота ВЧ	500 МГц
Время не запланированных остановок в год	Не более 0.4% (или 24 ч в год)
Максимальный заряд	15 нКл
Эффективность пропускания заряда выпуск/впуск	>75% (достигнуто 93%)

пользуемой на NSLS-II. Магнитная система, циклические и импульсные источники питания, диагностика, управление остаются полностью без изменений. Вакуумная система тоже останется без изменений, за исключением небольших удлинений на 7 см прямолинейных промежутков бустера. Это требуется, чтобы согласовать периметр бустера с кратностью длины волны, применяемого ВЧ. При ВЧ, равной 357 МГц, периметр бустера вместит 189 сепартрис ВЧ и составит 158.7 метра в отличие от бустера NSLS-II, имеющего периметр 158.4 м.

Частота работы бустера около 1 Гц. Но бустер был спроектирован с возможностью модернизации до 2 Гц (при необходимости).

В проектировании бустера NSLS-II принимали участие 30 конструкторов. К разработке и созданию отдельных штучных узлов ускорителя было привлечено более 50 научных сотрудников и инженеров ИЯФ. Работа 30 конструкторов была интегрирована в единую модель (рис. 2). В создании ускорителя принимали участие российские и европейские субподрядчики, но большая часть ускорителя была выполнена на базе экспериментального производства ИЯФ. В феврале 2014 г. бустер был успешно запущен, сдан заказчику и надежно работает по сей день [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для проектируемого источника СИ СКИФ предлагается использовать инжекционную систему, основанную на линейном ускорителе (200 МэВ) и бустерном синхротроне на полную энергию. Данное решение полностью обеспечит источник СИ пучками электронов нужного качества. А имеющийся в ИЯФ СО РАН опыт по участию в создании различных мировых источников СИ гарантирует создание в сжатые сроки инжекционного комплекса.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работы над предускорителем-группирователем ведутся при поддержке Российского научного фонда (№ 14-50-00080).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулипанов Г.Н., Мезенцев Н.А., Пиндюрин В.Ф. // Журнал структурной химии. 2016. Т. 57. № 7. С. 1351.
2. Zolotarev R.V. et al. // Physics Procedia. 2016. V. 84. P. 4. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.11.003>
3. Piminov P.A. et al. // Physics Procedia. 2016. V. 84. P. 19. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.11.005>
4. Gurov S.M. et al. // Physics Procedia. 2016. V. 84. P. 74. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.11.013>
5. NSLS-II Preliminary Design Report”, <http://www.bnl.gov/nsls2/project/PDR>
6. Volkov V.N., Arbuзов V.S., Kenzhebulatov E.K. et al. // Proceed. of RuPAC-2016, Peterhof, St. Petersburg, Russia 2016. С. 24.
7. Черноусов Ю.Д., Иванников В.И., Шеболаев И.В., Левичев А.Е, Павлов В.М. Ускоряющая структура с параллельной связью. Патент на изобретение. № RU2472244С1. Б.И. 10.01.2013. № 1.
8. Avilov M.S. et al. Test of accelerating section for VEPP-5 pre-injector. Preprint INP 2000-50, Novosibirsk, 2000
9. Gurov S. et al., Status of NSLS-II Booster, Problem of Atomic Science and Technology, 2012. 4(80). ISSN 1562-6016. ВАИТ. 2012. № 4 (80).
10. Willeke F., Commissioning of NSLS-II, Proceedings of International Particle Accelerator Conference IPAC'2015, Richmond, VA, USA, www.jacow.org/MOYGB3, <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2015-MOYGB3>

Injection System for Siberian Ring Source of Photons

S. M. Gurov¹, *, V. N. Volkov¹, K. V. Zolotarev¹, A. E. Levichev¹

¹*Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (BINP SB RAS),
Novosibirsk, 630090 Russia*

**e-mail: S.M.Gurov@inp.nsk.su*

The Siberian ring source of photons (SKIF) is a new source of synchrotron radiation of the fourth generation at 3 GeV and a circumference of 480 meters, which is being developed at Novosibirsk. To obtain bright synchrotron radiation beams, the SKIF must have an appropriate injection system that prepares intense electron beams. The article describes the proposed configuration of the injection system and its parameters. Electron bunches are produced by thermogun based on RF cavity. Then they are accelerated in linac up to 200 MeV and then they are accelerated up to 3 GeV in booster with circumference 160 meters. The injection complex will operate with frequency of 1 Hz and will be able to pump the main ring with current up to 400 mA in one minute.

Keywords: synchrotron light source, injection system, booster, linear accelerator.