

СИБИРСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал
Основан в 2006 году

2024. Том 19, № 3

СОДЕРЖАНИЕ

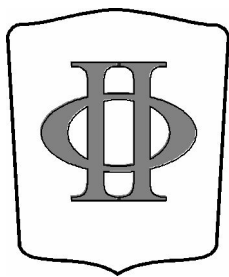
Физика высоких энергий, ускорителей и высокотемпературной плазмы

- Кропачев Г. Н., Кулевой Т. В., Ситников А. Л., Скачков В. С., Хабибуллина Е. Р., Сметанин М. Л., Тельнов А. В., Завьялов Н. В. Динамика частиц в инжекторе тяжелых ионов ЛУ2 для синхротронного исследовательского комплекса (СКИ) 5
- Барабин С. В., Лякин Д. А., Орлов А. Ю., Лосев А. А., Хрисанов И. А., Шумиуров А. В., Сатов Ю. А., Козлов А. В., Кулевой Т. В. Автоматизированная система управления лазерным источником тяжелых ионов для инжектора синхротронного комплекса МЦКИ 17
- Васильев Д. А., Кошелев А. В., Ковальцов В. И., Лутчев А. В., Маконин С. В., Пикалов В. А., Полковников М. К. Сопровождение облучений ионами углерода при проведении радиобиологических экспериментов на установке РБС 25
- Пикалов В. А., Суманев О. В., Сухарев М. М. Верификация расчетов защиты медицинской кабины ионно-лучевой терапии канала 26А проекта ЛУЧ У-70 38
- Дмитриев М. С., Дьяконов М. В., Жигайлова М. И., Иванов О. А., Краснов А. С., Туманов С. А. Концепция ЭЦР источника с рабочей частотой 2,45 ГГц с перестраиваемым магнитным полем 48
- Лачынов Ш. Б., Винокуров Н. А., Ческидов В. Г. Разработка магнитной системы на постоянных магнитах для энергосберегающего источника синхротронного излучения 57
- Лачынов Ш. Б., Винокуров Н. А., Ческидов В. Г. Магнитный группирователь с поворотом на 540 градусов 64
- Антохин Е. И., Елисеев В. С., Зуев В. В., Микайылов А. И., Буцыкина М. Д., Пахомов А. Ю., Жилев К. В., Востриков В. А., Дербышева Т. Р. Квадруполь на постоянных магнитах для финального фокуса 72
- Хабибуллина Е. Р., Кропачев Г. Н., Кулевой Т. В., Сергеева О. С., Кильметова И. В., Скачков В. С., Борисков А. С., Гузов М. А. Низкоэнергетический канал транспортировки (LEBT) линейного ускорителя тяжелых ионов 81

Физика твердого тела, полупроводников, наноструктур

- Почетухова В. В., Романов Д. А., Ващук Е. С., Филяков А. Д., Громов В. Е. Структура и свойства электровзрывного покрытия системы TiB₂-Ag после электронно-пучковой обработки 91

- Информация для авторов 109



Сибирский физический журнал

Журнал адресован профессорско-преподавательскому составу университетов, научным работникам, аспирантам и студентам, которые интересуются новейшими результатами фундаментальных и прикладных исследований по различным направлениям физики и физико-технической информатики.

Редакция принимает к опубликованию обзоры и оригинальные научные статьи по тем направлениям физики, которые, главным образом, представлены на кафедрах физического факультета НГУ. Принимаются также к рассмотрению статьи по другим направлениям, если в ходе рецензирования подтверждается их высокий научный статус.

Мы приглашаем научные коллективы и отдельных авторов направлять к нам для опубликования материалы по следующим основным разделам:

- квантовая оптика, квантовая электроника;
- радиофизика и электроника;
- теоретическая и математическая физика;
- физика жидкости, нейтральных и ионизованных газов;
- физика высоких энергий, ускорителей и высокотемпературной плазмы;
- физика твердого тела, полупроводников, наноструктур;
- физика химическая, биологическая и медицинская;
- информатика, информационно-коммуникационные технологии;
- учебно-методическое обеспечение преподавания физики.

Периодичность выхода издания – 4 раза в год. Журнал включен в перечень ВАК выпускаемых в Российской Федерации научных и научно-технических изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук.

SIBERIAN JOURNAL OF PHYSICS

Scientific Journal
Since 2006
In Russian

2024. Volume 19, № 3

CONTENTS

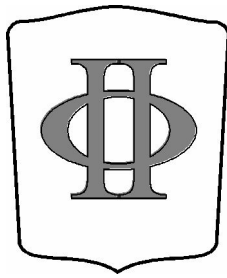
High-Energy and Accelerator Physics, Physics of High-Temperature Plasma

- Kropachev G. N., Kulevoy T. V., Sitnikov A. L., Skachkov V. S., Khabibullina E. R., Smetanin M. L., Telnov A. V., Zavyalov N. V.* Beam Dynamics in the Heavy Ion Injector LU2 for the Synchrotron Research Complex (SRC) 5
- Barabin S. V., Liakin D. A., Orlov A. Y., Losev A. A., Chrisanov I. A., Shumshurov A. V., Satov Y. A., Kozlov A. V., Kulevoy T. V.* Control System for a Heavy Ion Laser Source at Synchrotron Complex ICCR 17
- Vasiliev D. A., Koshelev A. V., Kovaltsov V. I., Lutchev A. V., Makonin S. V., Pikalov V. A., Polkovnikov M. K.* Monitoring and Control of Irradiation with Carbon Ions During Radiobiological Experiments at the RBS Experimental Set-Up 25
- Pikalov V. A., Sumaneev O. V., Sukharev M. M.* Verification of Calculation for the Protection of the Medical Cabin for Ion Therapy of Channel 26a of the Luch U-70 Project 38
- Dmitriev M. S., Dyakonov M. V., Zhigaylova M. I., Ivanov O. A., Krasnov A. S., Tumanov S. A.* Overall Concept Design of 2.45 GHz ECR Ion Source with Tunable Magnetic Field 48
- Lachynov S. B., Vinokurov N. A., Cheskidov V. G.* Development of a Permanent Magnet Magnetic System for an Energy-Saving Synchrotron Radiation Source 57
- Lachynov S. B., Vinokurov N. A., Cheskidov V. G.* The 540° Magnetic Buncher 64
- Antokhin E. I., Eliseev V. S., Zuev V. V., Mikaiylov A., Butskina M. D., Pakhomov A. Yu., Zhiliaev K. V., Vostrikov V. A., Derbysheva T. R.* Permanent Magnet Quadrupole for the Final Focus 72
- Khabibullina E. R., Kropachev G. N., Kulevoy T. V., Sergeeva O. S., Kilmetova I. V., Skachkov V. S., Boriskov A. S., Guzov M. A.* Lebt of the Heavy Ion Linear Accelerator 81

Solid-state and Semiconductor Physics, Physics of Nanostructures

- Pochetukha V. V., Romanov D. A., Vashchuk E. S., Filyakov A. D., Gromov V. E.* Structure and Properties of the Electroexplosive Coating of the TiB₂–Ag System after Electron Beam Treatment 91

- Instructions for Contributors** 109



Siberian Journal of Physics

The magazine is addressed to the faculty of universities, science officers, post-graduate students and students who are interested in the newest results fundamental and applied researches in various directions of physics and physico-technical computer science.

Edition accepts to publication reviews and original scientific articles in those directions of physics which, mainly, are presented on faculties of physical faculty of NSU. Are accepted also to viewing article in other directions if during reviewing their high title proves to be true.

We invite scientific personnel and separate authors to guide to us for publication materials on following basic sections:

- Quantum Optics, Quantum Electronics;
- Radiophysics and Electronics;
- The Theoretical and Mathematical Physics;
- Physics of a Fluid, Neutral and Ionized Gases;
- High-Energy and Accelerator Physics, Physics of High-Temperature Plasma;
- Solid-state and Semiconductor Physics, Physics of Nanostructures;
- Chemical, Biological and Medical Physics;
- Computer Science, Information-Communication Technologies;
- Educational and Methodical Provision of Teaching of Physics

Periodicity of an exit of the edition – 4 times a year. The magazine is included in list Higher Attestation Committee of scientific and technical editions in Russian Federation in which the publication of the basic results of dissertations on competition of a scientific degree of the doctor and candidate of sciences is recommended.

Editor in Chief Andrej V. Arzhannikov
Executive Secretary Sofiya A. Arzhannikova

Editorial Board of the Journal

S. V. Alekseenko, A. V. Arzhannikov, A. L. Aseev, S. N. Bagaev, A. E. Bondar
S. A. Dzyuba, S. I. Eidelman, V. S. Fadin, V. M. Fomin, A. A. Ivanov, V. A. Volodin, V. V. Kozlov, E. V. Kozyrev
A. V. Latyshev, I. B. Logashenko, V. P. Maltsev, A. G. Pogosov, A. L. Reznik, A. V. Shalagin
V. I. Telnov, S. V. Tsibulya

The series is published quarterly in Russian since 2006
by Novosibirsk State University Press

The address for correspondence
Physics Department, Novosibirsk State University
Pirogov Street 2, Novosibirsk, 630090, Russia
Tel. +7 (383) 363 44 25
E-mail address: physics@vestnik.nsu.ru
On-line version: <http://www.phys.nsu.ru/vestnik/>

Научная статья

УДК 621.384.6

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-5-16

Динамика частиц в инжекторе тяжелых ионов ЛУ2 для синхротронного исследовательского комплекса (СКИ)*

Геннадий Николаевич Кропачев^{1,2}, Тимур Вячеславович Кулевой^{1,3}
Алексей Леонидович Ситников¹, Владимир Сергеевич Скачков¹
Екатерина Рамисовна Хабибуллина^{1,3}, Максим Львович Сметанин⁴
Александр Валентинович Тельнов⁴, Николай Валентинович Завьялов⁴

¹НИЦ «Курчатовский институт»
Москва, Россия

²Объединенный институт ядерных исследований
Дубна, Московская область, Россия

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Москва, Россия

⁴Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики (РФЯЦ – ВНИИЭФ)
Саров, Россия

^{1,2}kropachev@itep.ru

^{1,3}kulevoy@itep.ru

¹aleksey.sitnikov@itep.ru

¹skachkov@itep.ru

^{1,3}ekaterina.khabibullina@itep.ru

⁴mlsmetanin@vniief.ru

⁴avtelnov@vniief.ru

⁴nvzavyalov@vniief.ru

Аннотация

В настоящее время на базе Российского федерального ядерного центра – Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики (РФЯЦ – ВНИИЭФ) разрабатывается проект комплекса для исследования воздействия ионизирующих излучений космического пространства, основой которого является синхротронный ускоритель, обеспечивающий ускорение протонов и различных типов ионов вплоть до 209Bi. Ускоритель включает два инжекторных комплекса (один из которых является источником протонов и легких ионов, второй – тяжелых ионов), бустерный ускоритель и основной синхротрон. В НИЦ «Курчатовский институт» – ККТЭФ разрабатывается ускоритель тяжелых ионов импульсного типа ЛУ2 на энергию до 4 МэВ на нуклон с током 10 мА. При этом должны ускоряться ионы, для которых отношение массы к заряду находится в пределах $4 \div 8$. Предлагается линейный ускоритель, включающий в себя секцию RFQ и две секции DTL, работающие на кратных частотах. Каждая секция DTL имеет модульную структуру и состоит из отдельных индивидуально фазированных резонаторов H-типа (IH-DTL) и квадрупольных линз, расположенных между резонаторами для фокусировки пучка. Такая структура DTL обеспечивает компактность линейного ускорителя, допускает по-секционную настройку и последовательный ввод в эксплуатацию. Между всеми секциями ускорителя осуществляется 6D-согласование пучков. Представлены результаты численного моделирования динамики частиц в ЛУ2.

*Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

Ключевые слова

RFQ, DTL, моделирование динамики пучка, тяжелые ионы

Для цитирования

Кропачев Г. Н., Кулевой Т. В., Ситников А. Л., Скачков В. С., Хабибуллина Е. Р., Сметанин М. Л., Тельнов А. В., Завьялов Н. В. Динамика частиц в инжекторе тяжелых ионов ЛУ2 для синхротронного исследовательского комплекса (СКИ) // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 3. С. 5–16. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-5-16

Beam Dynamics in the Heavy Ion Injector LU2 for the Synchrotron Research Complex (SRC)

Gennady N. Kropachev^{1,2}, Timur V. Kulevoy^{1,3}, Alexey L. Sitnikov¹
Vladimir S. Skachkov¹, Ekaterina R. Khabibullina^{1,3}, Maxim L. Smetanin⁴
Alexander V. Telnov⁴, Nikolay V. Zavyalov⁴

¹NRC “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia²Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow region, Russia³National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, Russia⁴FSUE RFNC – VNIIEF, Sarov, Russia^{1,2}kropachev@itep.ru^{1,3}kulevoy@itep.ru¹aleksey.sitnikov@itep.ru¹skachkov@itep.ru^{1,3}ekaterina.khabibullina@itep.ru⁴mlsmetanin@vniief.ru⁴avtelnov@vniief.ru⁴nvzavyalov@vniief.ru**Abstract**

The project of the complex for studying ionizing radiation exposure from outer space based on the synchrotron accelerator of protons and various types of ions up to 209Bi is being developed at the Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics (FSUE RFNC – VNIIEF). The accelerator includes two injection complexes (one of which is the source of protons and light ions, the second - heavy ions), the booster accelerator and the main synchrotron. The pulsed type heavy ions linac is being developed at the NRC “Kurchatov Institute” – KCTEF (Kurchatov Complex for Theoretical and Experimental Physics). The ions with mass-to-charge ratio $4 \div 8$ with current of 10 mA will be accelerated up to 4 MeV/u. The linac is proposed, including the RFQ and two DTL sections operating at multiple frequencies. Each DTL section is modular and consists of individually phased H-type resonators (IH-DTLs). Quadrupole lenses located between the resonators for the beam focusing. This DTL structure ensures the accelerator compactness and allows section-by-section configuration and sequential commissioning. 6D beam matching between all sections of the linac is carried out. The results of beam dynamics simulation in linear accelerator are presented.

Keywords

RFQ, DTL, beam dynamics simulation, heavy ions

For citation

Kropachev G. N., Kulevoy T. V., Sitnikov A. L., Skachkov V. S., Khabibullina E. R., Smetanin M. L., Telnov A. V., Zavyalov N. V. Beam dynamics in the heavy ion injector LU2 for the Synchrotron Research Complex (SRC). *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 3, pp. 5–16 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-5-16

Схема ускорителя ЛУ2

Предполагается, что ускоритель ЛУ2 для синхротронного исследовательского комплекса [1] будет иметь секцию RFQ [2] и две секции с трубками дрейфа DTL1 [3] и DTL2 [4], работающих на кратных частотах (рис. 1). Ускорители RFQ обладают рядом неоспоримых преимуществ: низкая энергия инжекции, большой коэффициент захвата в режим ускорения без увеличения фазовой плотности в поперечном пространстве, отсутствие требования предварительной группировки пучка и др. Однако секция с RFQ удобна только как начальная часть

линейного ускорителя на высокие энергии и большую интенсивность, поскольку при больших скоростях не удастся обеспечить высокого темпа ускорения. Секции с DTL1 и DTL2 позволяют ускорять ионы на требуемую энергию без потерь частиц. Секции с DTL1 и DTL2 построены по модульному принципу и состоят из цепочки отдельных, индивидуально фазированных резонаторов с фокусировкой магнитными квадрупольями, размещаемыми между ними. Между RFQ и DTL1 располагается канал транспортировки МEBT1, который осуществляет 6-мерное согласование RFQ и DTL1. Канал транспортировки МEBT2 осуществляет 6-мерное согласование между DTL1 и DTL2.

Основные требования к разрабатываемому ускорителю

Определим базовые характеристики ускорителя. Транспорт ускорителя – это отношение числа частиц на выходе ускорителя к числу инжектируемых частиц. Трансмиссия ускорителя – это отношение числа ускоренных частиц на выходе ускорителя к числу инжектируемых частиц.

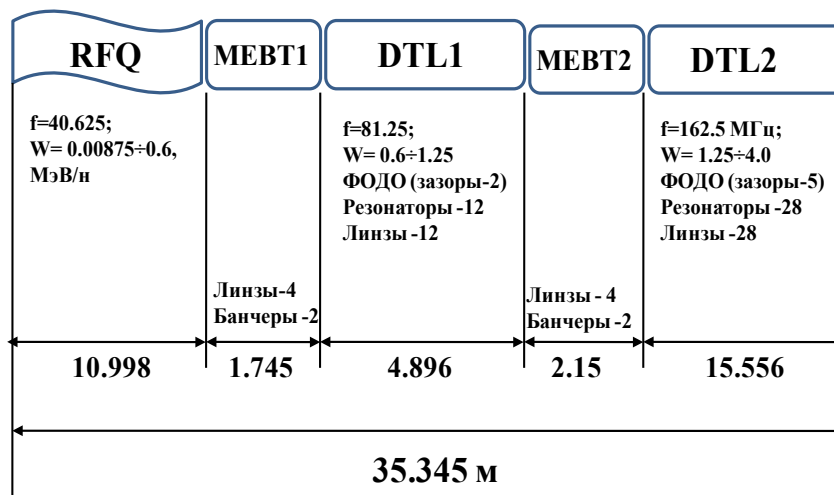


Рис. 1. Схема ускорителя ЛУ2

Fig. 1. LU2 scheme

Сформулируем основные требования к разрабатываемому ускорителю:

- ионы с отношением массы к заряду: $4 \leq A/Z \leq 8$;
- ток ускоренных частиц: ≥ 10 мА;
- транспорт: ~ 100 %;
- трансмиссия: ≥ 95 %;
- режим работы: импульсный;
- максимальная напряженность на поверхности электродов (в единицах Килпатрика):

$K_p = 1,8$;

- отношение акцептанса канала к эмиттансу пучка ≥ 3 .

Основные параметры RFQ и ИH-DTL представлены в таблице.

Разрабатываемый ускоритель является импульсной машиной, но должен работать в режиме длительного временного промежутка, тем самым обладать высокой надежностью, что накладывает на ускоряющие структуры дополнительные требования. Особенностью ускорителей с таким режимом работы является требование практического отсутствия потерь в ускоряющих структурах. Поэтому в канале с RFQ необходимо обеспечить прохождение пучка, близкое к 100 %.

При создании ускорителя особую роль играет выбор напряженности электрического поля. Высокое значение напряженности приводит к увеличению числа электрических пробоев, низкое – к уменьшению аксептанса канала. Напряженность электрического поля на поверхности электродов обычно выбирают, ориентируясь на критерий Килпатрика. Принимая во внимание литературные данные по рекомендуемой напряженности поля на поверхности электродов [5], выберем величину $K_p = 1,8$, где K_p – единицы Килпатрика.

Основные расчетные параметры RFQ & DTL1 & DTL2 для ускорителя ЛУ2

The main parameters of the RFQ & DTL1 & DTL2 for LU2

Параметр	Значение		
Отношение массы к заряду	≤ 8		
Нормализованный эмиттанс пучка, [п мм·мрад]	2		
Ток инжекции, [мА]	10		
Напряжение инжекции, [кВ]	70		
Максимальная напряженность поля на поверхности электродов, [Кр]	1,8		
Ускоряющая структура	RFQ	DTL1	DTL2
Рабочая частота, [МГц]	40,625	81,25	162,5
Энергия пучка, [МэВ/нуклон]	$0,00875 \div 0,6$	$0,6 \div 1,25$	$1,25 \div 4$
Нормализованный аксептанс канала, [п мм·мрад]	6	7,5	8,1
Отношение аксептанса к эмиттансу	3		
Синхронная фаза, [град]	$-90 \div -35$	$-50 \div -40$	$-50 \div -40$
Радиус апертуры, [мм]	$32,6 \div 8,9$	21	25
Напряжение между электродами, [кВ]	170	–	
Максимальное поле в зазоре, [кВ/см]	–	80	$77 \div 107$
Средний радиус, [мм]	12,5	–	
Радиус электрода, [мм]	10	–	
Максимальная модуляция	1,809	–	
Число магнитных линз	–	12	28
Длина линзы, [мм]	–	130	130
Радиус апертуры линзы, [мм]	–	22,5	22,5
Максимальный градиент, [Тл/м]	–	41	34
Число резонаторов	–	12	28
Длина резонатора, [мм]	–	208	$280 \div 442$
Длина структуры, [м]	11,0	4,9	15,6

Динамика пучка ионов в секции с RFQ

С использованием базовых параметров канала RFQ, представленных в таблице, проведено моделирование динамики пучка в секции RFQ. Вычисления проводились методом крупных частиц [6] с помощью программ TraceWin [7].

При выборе параметров ускоряюще-фокусирующего канала ускорителя использована методика, основанная на законах подобия в RFQ и описанная в работе [8] и примененная в [9; 10]. Параметры RFQ выбраны исходя из условия приблизительного равенства набегов фаз продольных и поперечных колебаний ионов на периоде фокусировки. Рабочая точка располагается вне полос параметрического резонанса между фазовыми и радиальными колебаниями частиц. При таком выборе параметров RFQ, с одной стороны, достигается достаточно низкая связь между степенями свободы, а с другой стороны, обеспечивается максимальный темп ускорения и высокий продольный захват.

Одна из основных характеристик ускорителя – акцептанс. Как известно из [2], акцептансом канала называют максимально возможный эмиттанс согласованного пучка, еще пропускаемого каналом. На вход RFQ поступает пучок с эмиттансом 2π мм мрад. Тогда, следуя книге И. М. Капчинского [2], в качестве акцептанса примем величину 6π мм мрад, т. е. в 3 раза большую.

При 4-мерном согласовании пучка (стандартном согласовании) начальные условия на входе RFQ имеют следующий вид. Частицы на продольной фазовой плоскости распределяются равномерно на отрезке с фазовой протяженностью 360° с разбросом по энергиям $\pm 1\%$, что является характерным значением для большинства источников ионов. В поперечном направлении на вход подается практически аксиально-симметричный сходящийся пучок.

На рис. 2 приведены огибающие пучка в RFQ. Из данного рисунка видно, что максимумы огибающих пучка практически не возрастают, т. е. пучок хорошо согласован с ускорителем. Из 100 000 инжектируемых макрочастиц 99 986 дошли до выхода ускорителя, т. е. величина транспорта составляет 99,99 % ($\sim 100\%$), трансмиссия ускорителя составляет 99,4 %. Кроме того, можно отметить, что наиболее плотная часть пучка (его ядро) занимает примерно 0,75 от апертурной области канала, где действие сил электрического поля, как правило, линейно, что дает минимальный вклад в рост фазового объема. На данном рисунке также можно заметить хорошее согласование пучка с ускорителем.

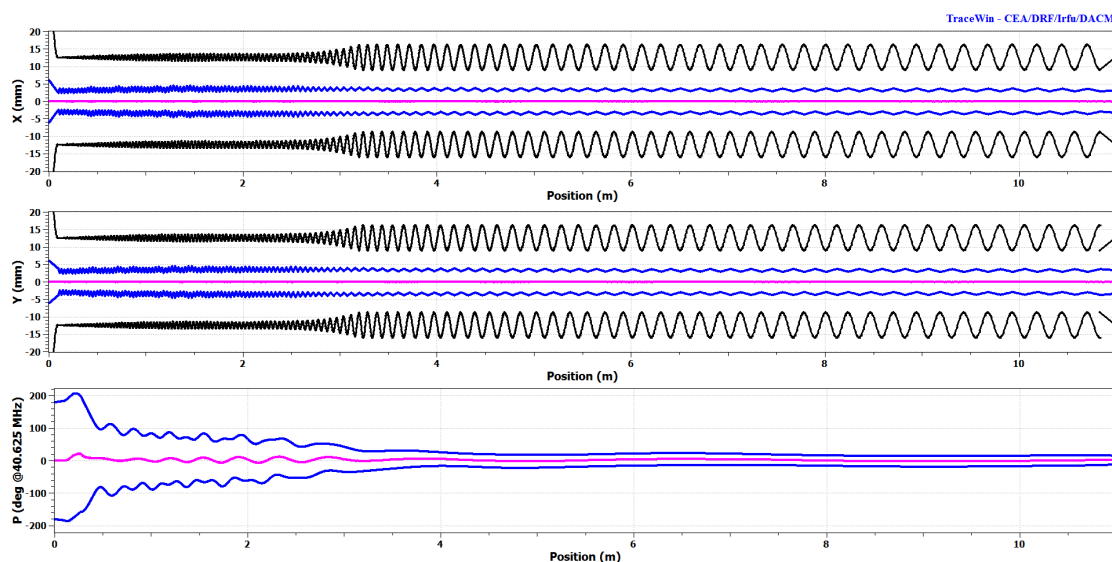


Рис. 2. Огибающие пучка в RFQ
Fig. 2. Beam envelopes in RFQ

Незначительная часть ионов (меньше 0,5 %) не набрала энергии синхронной частицы и в дальнейшем будет потеряна в магнитных линзах канала согласования. Разработанный ка-

нал RFQ с нормализованным аксептансом $6 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ устойчив к величине входного эмиттанта в широком диапазоне его изменения.

Динамика пучка ионов в ускоряющей секции DTL1

Как уже отмечалось выше, секция DTL1 будет состоять из цепочки отдельных, индивидуально фазированных ускоряющих резонаторов с фокусировкой магнитными квадрупольями, размещаемыми между этими резонаторами. Переход в секции DTL1 к частоте возбуждения, вдвое большей, чем частота в RFQ (40.625 МГц), позволяет уменьшить габариты резонатора с трубками дрейфа и увеличить допустимую длину периода фокусировки. Нормализованный аксептанс канала A_n связан с частотой ускоряющего поля f , радиусом апертуры канала R_a , минимальным значением частоты поперечных колебаний ν_F и кратностью периода фокусировки K_F , соотношением [2]:

$$A_n = \nu_F \frac{f \cdot R_a^2}{K_F}, \quad (1)$$

где $K_F = S_F/(\beta\lambda)$, S_F – длина периода фокусировки.

Таким образом, при переходе на частоту вдвое большую можно увеличить вдвое кратность периода фокусировки, не изменяя радиус апертуры канала и получить такую же величину аксептанса.

Для минимизации длины в качестве ускоряющих элементов выбран 2-зоровый четвертьволновый резонатор [3]. В качестве базовой магнитной линзы используется квадрупольная линза длиной 130 мм, радиусом апертуры 22,5 мм и максимальным градиентом $G_{\max} = 48 \text{ Тл/м}$. Данная линза оптимальна по соотношению достижимых градиентов, продольного размера и линейности поля.

При разработке ускоряющей секции DTL1 были рассмотрены различные структуры периодов фокусировки [11] с использованием двухзорового резонатора (дуплеты, триплеты и др.). Показано, что период фокусировки типа ФОДО наиболее полно удовлетворяет требованиям к DTL1. Когда после магнитной линзы следует ускоряющий промежуток, действие магнитной линзы эффективнее, чем в дуплетах и триплетах. Это позволяет существенно снизить градиенты G в магнитной линзе и обеспечить в них $G \leq G_{\max}$. Таким образом, период типа ФОДО позволяет обеспечить требуемое значение аксептанса канала при достижимых градиентах в базовой квадрупольной линзе.

В таблице приведены основные параметры DTL1 секции на основе структуры периода фокусировки ФОДО. Как и для RFQ, параметры DTL1 выбраны исходя из условия приближительного равенства набегов фаз продольных и поперечных колебаний ионов на периоде фокусировки. Рабочая точка располагается вне полос параметрического резонанса между фазовыми и радиальными колебаниями частиц. При таком выборе параметров DTL1, с одной стороны, достигается достаточно низкая связь между степенями свободы, а с другой стороны, обеспечивается максимальный темп ускорения и высокий продольный захват. Заметим, что равновесная фаза изменяется в пределах $-50^\circ \div -40^\circ$. С одной стороны, это обеспечивает значительную фазовую протяженность продольного аксептанса, что необходимо для надежного перезахвата эффективного эмиттанта RFQ, с другой стороны, такое изменение синхронной фазы позволяет уменьшить фактор дефокусировки (снижаются градиенты в магнитных линзах) и увеличить темп ускорения (сокращается длина ускорителя). Отличительной особенностью данной ускоряющей секции DTL1 является использование резонаторов одной длины 208 мм, что позволит значительно упростить изготовление и настройку ускоряющей секции, а также снизить стоимость изготовления.

На входе в канал DTL1, по аналогии с RFQ, определяются согласованные начальные условия (согласованный эмиттанс). С учетом найденных начальных согласованных условий определены огибающие пучка и его профиль. На рис. 3 представлены огибающие пучка в DTL1 для периода фокусировки ФОДО. Из данного рисунка видно, что максимумы огибающих пучка практически не возрастают, т. е. пучок хорошо согласован с ускорителем. Из 99400 инжектируемых макрочастиц все дошли до выхода ускорителя, т. е. в канале нет потерянных частиц и величина транспорта = 100 %, трансмиссии = 100 %.

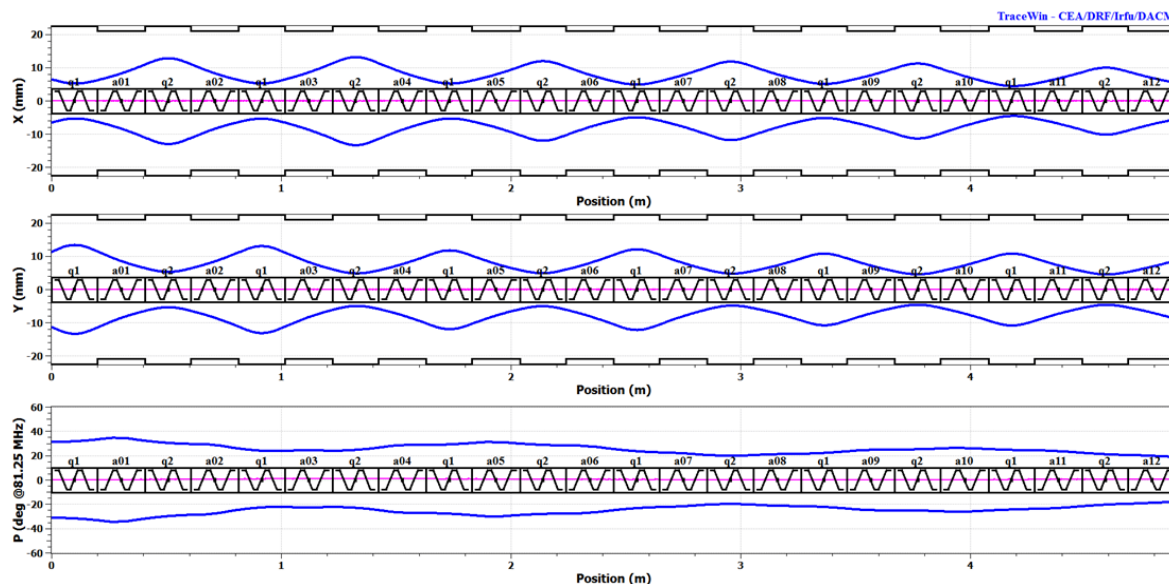


Рис. 3. Огибающие пучка в DTL1 для периода фокусировки ФОДО

Fig. 3. Beam envelopes in DTL1 for the FODO focusing period

Динамика пучка ионов в ускоряющей секции DTL2

Согласно соотношению 1, при переходе на частоту вдвое большую можно увеличить вдвое кратность периода фокусировки, не изменяя радиус апертуры канала и получить такую же величину акцептанса. Переход в секции DTL2 к частоте возбуждения 162,5 МГц, вдвое большей, чем частота в DTL1 (81,25 МГц), позволяет уменьшить габариты резонатора с трубками дрейфа и увеличить допустимую длину периода фокусировки и существенно сократить число резонаторов в ускорителе.

Как показано выше (формула 1), акцептанс канала обратно пропорционален длине периода фокусировки, поэтому для минимизации длины в качестве ускоряющих элементов выбран 5-ззорный четвертьволновый резонатор [4]. Особенность данного резонатора – при всех одинаковых длинах зазоров максимальное продольное электрическое поле на оси для крайних зазоров вдвое меньше поля в остальных зазорах, т. е. выполняется следующее условие: длина зазора $g = \text{const}$; $E_{g1} = E_{g5} = E_{g\text{max}}/2$; $E_{g2} = E_{g3} = E_{g4} = E_{g\text{max}}$. Такое распределение поля облегчает настройку резонаторов, а также минимизирует максимальную напряженность электрического поля на поверхности трубок дрейфа.

Период фокусировки типа ФОДО в секции DTL2 позволяет обеспечить требуемое значение акцептанса канала при достижимых градиентах в базовой квадрупольной линзе и приемлемых значениях апертуры трубок дрейфа. В таблице приведены основные параметры DTL2 секции на основе структуры периода фокусировки ФОДО.

На входе в канал DTL2, по аналогии с DTL1, определяются согласованные начальные условия (согласованный эмиттанс). С учетом найденных начальных согласованных условий определены огибающие пучка и его профиль. На рис. 4 представлены огибающие пучка в DTL2 для периода фокусировки ФОДО.

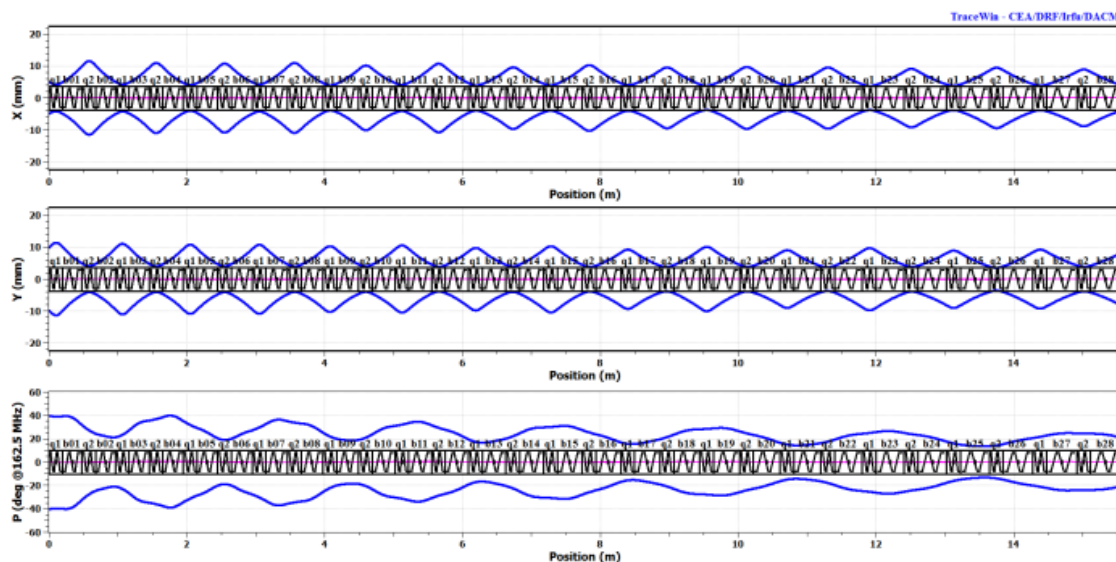


Рис. 4. Огибающие пучка в DTL2 для периода фокусировки ФОДО

Fig. 4. Beam envelopes in DTL2 for the FODO focusing period

Величина транспорта и трансмиссии в секции DTL2 составляет 100 %. Наиболее плотная часть пучка (его ядро) не превышает 0,75 от апертурной области канала, где, как правило, действие сил электрического поля линейно, что дает минимальный вклад в рост фазового объема.

Динамика пучка ионов в каналах МЕВТ1 и МЕВТ2

Между RFQ и DTL1 располагается канал транспортировки МЕВТ1, который обеспечивает 6-мерное согласование RFQ и DTL1. Канал транспортировки МЕВТ2 осуществляет 6-мерное согласование между DTL1 и DTL2.

МЕВТ1 состоит из четырех квадрупольных магнитных линз, обеспечивающих четырехмерное поперечное согласование, а также двух двухзачерных банчеров для продольного согласования. Необходимым условием эффективной работы канала МЕВТ1 является обеспечение требуемой величины акцептанса, которая не должна быть меньше величины акцептанса последующей секции DTL1, т. е. не меньше $7,5 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$. Общая длина канала МЕВТ1 составляет 1745 мм. Предполагаемая для использования магнитная квадрупольная линза [12] имеет следующие параметры: длина линзы в пространстве – 170 мм (имеются шиммы), радиус апертуры по пучку – 30 мм, максимальный градиент 32 Тл/м, область, занимаемая магнитным полем линзы, составляет практически 240 мм. Каждый банчер имеет длину 170 мм и радиус апертуры 25 мм.

Банчер имеет два зазора длиной 20 мм, три трубки дрейфа длиной соответственно 45, 40, 45 мм. Максимальное поле в зазоре не должно превышать 67 кВ/см, при этом выполняется условие для максимальной напряженности поля на поверхности трубок дрейфа $E_{\text{max}} \leq 1,8 K_p$.

На рис. 5 изображены огибающие пучка в канале МЕВТ1. Градиенты магнитных линз равны соответственно $-29,1; 24,5; -27,9; 20,3$ Тл/м, что меньше максимально допустимого значения 32 Тл/м. Амплитуды электрических полей в зазорах для первого банчера составляет со-

ответственно 22 кВ/см, а для второго – 45 кВ/см, при этом нет превышения максимальной напряженности на поверхности электродов. Канал обеспечивает прохождение частиц без потерь, т. е. величина транспорта = 100 %. Все частицы, дошедшие до конца МЕВТ1, сгруппированы около синхронной частицы, т. е. ускорены, и величина трансмиссии = 100 %.

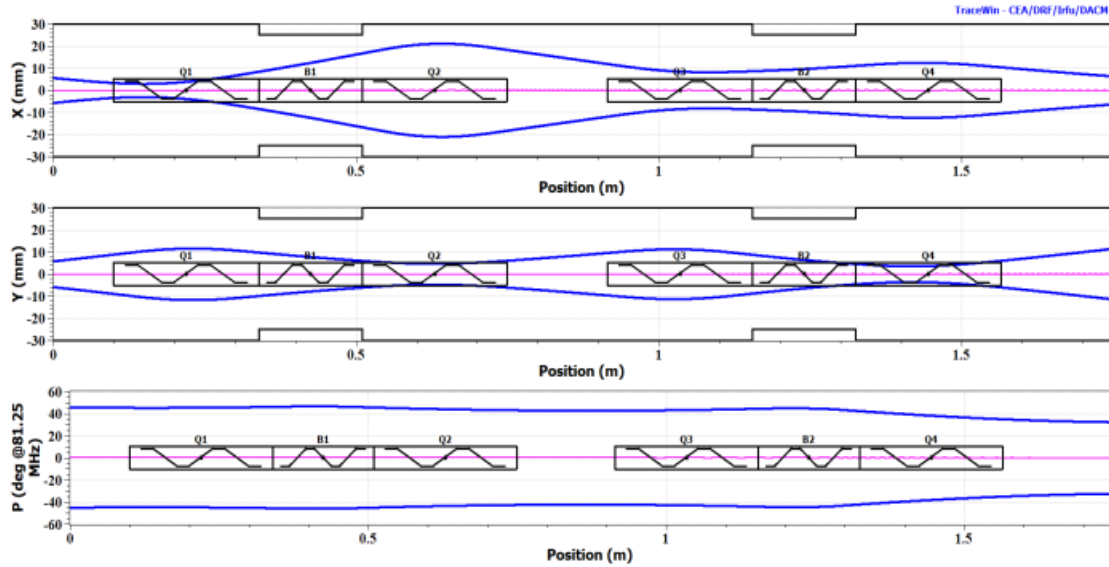


Рис. 5. Огибающие пучка для канала МЕВТ1

Fig. 5. Beam envelopes for the MEBT1

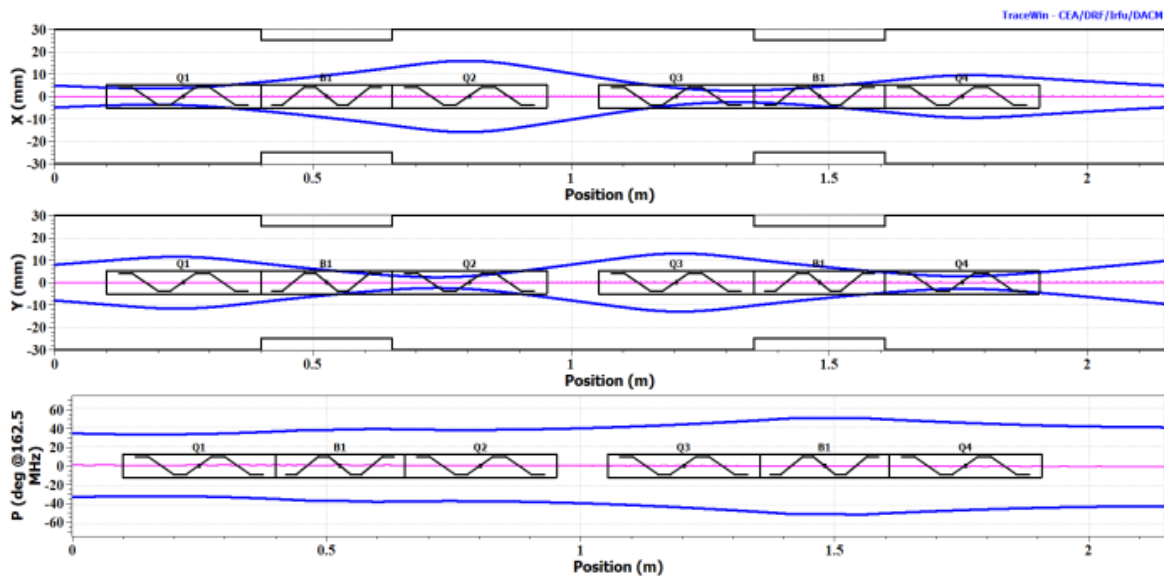


Рис. 6. Огибающие пучка для канала МЕВТ2

Fig. 6. Beam envelopes for the MEBT2

МЕВТ2 состоит из четырех квадрупольных магнитных линз, обеспечивающих четырехмерное поперечное согласование, а также двух двухзачерных банчеров для продольного согласования. Необходимым условием эффективной работы канала МЕВТ2 является обеспечения требуемой величины аксептанса, которая не должна быть меньше величины аксептанса последующей секции DTL1, т. е. не меньше $8,1 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$. Общая длина канала МЕВТ1 составляет

2 150 мм. Основные параметры предполагаемой магнитной квадрупольной линзы [12]: длина линзы в пространстве – 170 мм, радиус апертуры по пучку – 30 мм, максимальный градиент – 38 Тл/м, область, занимаемая магнитным полем линзы, составляет практически 300 мм.

Каждый банчер имеет длину 254 мм и радиус апертуры 25 мм. Банчер имеет два зазора длиной 40 мм, три трубки дрейфа длиной соответственно 35, 104, 35 мм. Максимальное поле в зазоре не должно превышать 100 кВ/см.

На рис. 6 изображены огибающие пучка в канале МЕВТ2. Градиенты магнитных линз меньше максимально допустимого значения 38 Тл/м. Амплитуды электрических полей в зазорах обоих банчеров составляют 90 кВ/см, при этом нет превышения максимальной напряженности на поверхности электродов. Величина транспорта и трансмиссии – 100 %.

В каналах транспортировки МЕВТ1 и МЕВТ2 определено место размещения элементов диагностики: цилиндр Фарадея; индукционный датчик; измеритель положения пучка; измеритель эмиттанса; измеритель профиля пучка.

Рассмотрим эволюцию поперечного эмиттанса вдоль всего ускорителя ЛУ2. При инжекции в RFQ величина эмиттанса составляет $2 \text{ п} \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$. На выходе RFQ эмиттанс равен $2,4 \text{ п} \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$, т. е. рост эмиттанса на RFQ составляет 1,2. Рост эмиттанса в канале МЕВТ1 – 1,03. На выходе DTL1 эмиттанс равен $2,65 \text{ п} \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$, так что рост эмиттанса в канале DTL1 составляет 1,11. Рост эмиттанса в канале МЕВТ2 – 1,02. На выходе DTL2 эмиттанс равен $3,02 \text{ п} \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$, так что рост эмиттанса в канале DTL2 составляет 1,14. Превышение роста эмиттанса в DTL2 по сравнению с DTL1 можно объяснить существенным отличием по длине канала. Таким образом, рост эмиттанса в ускорителе ЛУ2 составляет 1,5.

Заключение

Предлагаемая схема ускорителя для тяжелых ионов ЛУ2 включает:

- структуру RFQ на частоте 40,625 МГц, где происходит формирование пучка из непрерывного в отдельные сгустки и подготовка для его дальнейшего перезахвата в последующей ускоряющей структуре DTL1. В предлагаемом канале RFQ удастся достичь транспорта = 100 % и трансмиссии 99,4 %;
- канал МЕВТ1, в котором осуществляется 6-мерное согласование между RFQ и DTL. МЕВТ1 содержит четыре магнитные квадрупольные линзы (согласующий квадруплет), а также два двухззорных банчера;
- секцию DTL1 на частоте 81,25 МГц, которая состоит из цепочки отдельных, индивидуально фазированных 2-ззорных ускоряющих четвертьволновых резонаторов с фокусировкой электромагнитными квадрупольными, размещаемыми между этими резонаторами. Периоды фокусировки имеют строение ФОДО. Данная секция обеспечивает 100%-й транспорт и 100%-ю трансмиссию пучка, поступающего из RFQ;
- канал МЕВТ2, в котором осуществляется 6-мерное согласование между DTL1 и DTL2. МЕВТ2 содержит четыре магнитные квадрупольные линзы (согласующий квадруплет), а также два двухззорных банчера;
- секцию DTL2 на частоте 162,5 МГц, которая состоит из цепочки отдельных, индивидуально фазированных 5-ззорных ускоряющих ИР-резонаторов с фокусировкой электромагнитными квадрупольными, размещаемыми между этими резонаторами. Периоды фокусировки имеют строение ФОДО. Данная секция обеспечивает 100%-й транспорт и 100%-ю трансмиссию пучка, поступающего из DTL1;
- во всех секциях ускорителя выполняется соотношение аксептанса канала к эмиттансу пучка, равное 3;
- во всех секциях ускорителя выполняется ограничение по максимальной напряженности электрического поля на поверхности электродов или трубок дрейфа ($K_p = 1,8$);

Ускоритель, разработанный по предложенной схеме, позволяет работать на кратных частотах: 40,6254 81,25 и 162,5 МГц в импульсном режиме и ускорять тяжелые ионы $4 \leq A/Z \leq 8$ с номинальным током 10 мА до энергии 4 МэВ/нуклон при общей трансмиссии 99,4 % и общим ростом эмиттанса 1,5.

Список литературы

1. **Завьялов Н. В.** Исследовательские установки РФЯЦ–ВНИИЭФ для экспериментального получения фундаментальных и прикладных знаний в области ядерной, радиационной физики и физики быстропротекающих процессов // *Успехи физических наук*. 2021. Т. 191, № 9.
2. **Капчинский И. М.** Теория линейных резонансных ускорителей. М.: Энергоиздат, 1982. С. 130–144.
3. **Ситников А. Л. и др.** Моделирование электродинамических характеристик ускоряющего двухзазорного резонатора с трубками дрейфа // *ПТЭ*. 2024 (в печати).
4. **Ситников А. Л. и др.** Моделирование электродинамических характеристик ускоряющего пятизазорного резонатора с трубками дрейфа // *ПТЭ*. 2024 (в печати).
5. **Тепляков В. А.** Исследование возможности создания начальной части ускорителя непрерывного режима на энергию 5 МэВ. Протвино, 2000.
6. **Рошаль А. С.** Моделирование заряженных пучков. М.: Атомиздат, 1979.
7. **Uriot D., Pichoff N.** Status of TraceWin Code, Proceedings of IPAC2015, Richmond, VA, USA, pp. 92–94.
8. **Wadlinger E. A.** Scaling Laws for RFQ Design Procedures, Proc. PAC 1985, Vancouver, British Columbia, May 13–16, 1985, pp. 2596–2598
9. **Kulevoy T. et al.** Compact Multipurpose Facility – BELA, in ProcLINAC 2018, Beijing, China, pp. 349–351.
10. **Butenko A. V. et al.** Commissioning of New Proton and Light Ion Injector for Nuclotron – NICA. Proceeding of IPAC 2016, Busan, Korea, pp. 941–941.
11. **Баранова Л. А., Явор С. Я.** Электростатические электронные линзы. М.: Наука, 1986.
12. **Кильметова И. В. и др.,** Магнитные элементы низкоэнергетического канала для ускорителя тяжелых ионов // *ПТЭ*. 2024 (в печати).

References

1. **Zavyalov N. V.** Research facilities of the RFNC-VNIIEF for the experimental acquisition of fundamental and applied knowledge in the field of nuclear, radiation physics and physics of fast processes. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 2021, vol. 191, no. 9.
2. **Kapchinsky I. M.** Theory of linear resonant accelerators. Moscow, Energoizdat publ., 1982, pp. 130–144.
3. **Sitnikov A. L. et al.** Simulation of electrodynamic characteristics of the accelerating 2-gap resonator with drift tubes. *Instruments and Experimental Techniques*, 2024 (accepted to print).
4. **Sitnikov A. L. et al.** Simulation of electrodynamic characteristics of the accelerating 5-gap resonator with drift tubes. *Instruments and Experimental Techniques*, 2024 (accepted to print).
5. **Teplyakov V. A.** Study of the possibility of creating the initial part of a continuous-mode accelerator with an energy of 5 MeV, Protvino, 2000.
6. **Roshal A. S.** Modeling of charged beams. Moscow, Atomizdat publ., 1979.
7. **Uriot D., Pichoff N.** Status of TraceWin Code, Proceedings of IPAC2015, Richmond, VA, USA, pp. 92–94.
8. **Wadlinger E. A.** Scaling Laws for RFQ Design Procedures, Proc. PAC 1985, Vancouver, British Columbia, May 13–16, 1985, pp. 2596–2598

9. **Kulevoy T. et al.** Compact Multipurpose Facility – BELA', in ProcLINAC2018, Beijing, China, pp. 349-351
10. **Butenko A. V. et al.** Commissioning of New Proton and Light Ion Injector for Nuclotron – NICA. Proceeding of IPAC2016, Busan, Korea, pp. 941–941.
11. **Baranova L. A., Yavor S. Ya.** Electrostatic electron lenses. Moscow, Nauka publ., 1986.
12. **Kilmetova I. V. et al.** Magnetic elements of a low-energy channel for a heavy-ion accelerator. *Instruments and Experimental Techniques*, 2024 (accepted to print).

Сведения об авторах

Кропачев Геннадий Николаевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник

Кулевой Тимур Вячеславович, доктор технических наук, зам. руководителя ККТЭФ по прикладным научным исследованиям и экспериментальным установкам

Ситников Алексей Леонидович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Скачков Владимир Сергеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Хабибуллина Екатерина Рамисовна, младший научный сотрудник

Сметанин Максим Львович, заместитель начальника научно-исследовательского отделения – начальник научно-исследовательского отдела, РФЯЦ – ВНИИЭФ

Тельнов Александр Валентинович, кандидат физико-математических наук, заместитель директора ИЯРФ по радиационным комплексам – начальник научно-исследовательского отделения РФЯЦ – ВНИИЭФ

Завьялов Николай Валентинович, доктор физико-математических наук, директор ИЯРФ, РФЯЦ – ВНИИЭФ

Information about the Authors

Gennady N. Kropachev, Ph.D. in Physics and Mathematics Sciences, Leading Researcher

Timur V. Kulevoy, Doctor of Engineering Sciences, Deputy Head of KCTEP for applied scientific research and experimental installations

Alexey L. Sitnikov, Ph.D. in Physics and Mathematics Sciences, Senior Researcher

Vladimir S. Skachkov, Ph.D. in Engineering Sciences, Senior Researcher

Ekaterina R. Khabibullina, Junior Researcher

Maxim L. Smetanin, Deputy Head of the Research Department – Head of the Research Department

Alexander V. Telnov, Ph.D. in Physics and Mathematics Sciences, Deputy Director of the Institute of Nuclear Physics for Radiation Complexes – Head of the Research Department

Nikolay V. Zavyalov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Director of the Institute of Nuclear Physics

*Статья поступила в редакцию 11.09.2023; одобрена после рецензирования 02.10.2023;
принята к публикации 05.03.2024*

*The article was submitted 11.09.2023; approved after reviewing 02.10.2023;
accepted for publication 05.03.2024*

Научная статья

УДК 681.518.5

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-17-24

Автоматизированная система управления лазерным источником тяжелых ионов для инжектора синхротронного комплекса МЦКИ*

**Сергей Викторович Барабин¹, Дмитрий Александрович Лякин²
Андрей Юрьевич Орлов³, Антон Андреевич Лосев⁴
Игорь Александрович Хрисанов⁵, Александр Викторович Шумшуров⁶
Юрий Алексеевич Сатов⁷, Александр Владимирович Козлов⁸
Тимур Вячеславович Кулевой⁹**

НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

¹barabin@itep.ru

²liakin@itep.ru

³Andrey.Orlov@itep.ru

⁴Anton.Losev@itep.ru

⁵hrisanov@itep.ru

⁶Alexander.Shumshurov@itep.ru

⁷satov@itep.ru

⁸kozlov@itep.ru

⁹kulevoy@itep.ru

Аннотация

Описывается автоматизированная система управления (АСУ) лазерно-плазменным источником тяжелых ионов (ЛПИТИ) для инжектора синхротронного комплекса МЦКИ. Система управления имеет иерархическую многоуровневую архитектуру, определяемую иерархической структурой лазерного источника ионов, и является частью системы управления линейного инжектора тяжелых ионов и всего синхротронного комплекса. Указываются основные требования к системе управления и общие принципы построения АСУ ЛПИТИ и выбранные в соответствии с этими требованиями и принципами схемотехнические и программные решения, такие как: организация обмена данными между отдельными узлами в АСУ; определение алгоритмов работы с отдельными устройствами и подсистемами ионного источника и ионного источника как единой системы, выбранные типы и структурные схемы контроллеров отдельных подсистем и их работы. Описывается иерархическая структура АСУ, основные устройства и подсистемы АСУ лазерного источника, и организация их управления.

Ключевые слова

автоматизированная система управления, лазерный источник ионов

Для цитирования

Барабин С. В., Лякин Д. А., Орлов А. Ю., Лосев А. А., Хрисанов И. А., Шумшуров А. В., Сатов Ю. А., Козлов А. В., Кулевой Т. В. Автоматизированная система управления лазерным источником тяжелых ионов для инжектора синхротронного комплекса МЦКИ // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 3. С. 17–24. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-17-24

*Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

Control System for a Heavy Ion Laser Source at Synchrotron Complex ICCR

Sergey V. Barabin, Dmitry A. Liakin, Andrey Y. Orlov
Anton A. Losev, Igor A. Chrisanov, Alexander V. Shumshurov
Yury A. Satov, Alexander V. Kozlov, Timur V. Kulevoy

NRC “Kurchatov Institute”, Moscow, Russian Federation

¹barabin@itep.ru

²liakin@itep.ru

³Andrey.Orlov@itep.ru

⁴Anton.Losev@itep.ru

⁵hrisanov@itep.ru

⁶Alexander.Shumshurov@itep.ru

⁷satov@itep.ru

⁸kozlov@itep.ru

⁹kulevoy@itep.ru

Abstract

The article describes the control system for a laser source of heavy ions. The control system has a hierarchical multilevel architecture, determined by the hierarchical structure of the laser ion source, and is a part of the control systems of the linear heavy ion injector and the entire synchrotron complex. The article describes the basic requirements for the control system and the general principles of its construction, and the circuitry and software solutions selected in accordance with these requirements and principles, such as: organization of data exchange between individual nodes in the automated control system; determination of algorithms for working with individual devices and subsystems of the ion source, and with the ion source as a unified system; selection of types and structural schemes of controllers of individual subsystems. The hierarchical structure of the automated control system and control subsystems for all the main devices of the laser source are also described.

Keywords

control system, laser ion source

For citation

Barabin S. V., Liakin D. A., Orlov A. Y., Losev A. A., Chrisanov I. A., Shumshurov A. V., Satov Y. A., Kozlov A. V., Kulevoy T. V. Control system for a heavy ion laser source at synchrotron complex ICCR. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 3, pp. 17–24 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-17-24

Введение

Линейный резонансный ускоритель тяжелых ионов ЛУ2 из состава инжекторного комплекса бустерного ускорителя синхротронного комплекса МЦКИ (Межведомственный центр комплексных радиационных исследований и испытаний) [1], создаваемого во ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ», предназначен для формирования и начального ускорения пучков тяжелых ионов до энергии 4 МэВ/нуклон ($1/4 \geq Z/A \geq 1/8$) для последующей их инжекции в бустер. Генерация ионов осуществляется лазерно-плазменным источником тяжелых ионов (ЛПИТИ) [2] на основе лазерного генератора плазмы. Последующее ускорение ионов происходит в цепочке линейных ускоряющих структур, последовательно в структуре с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ) и двух типах структур с трубками дрейфа. Согласование пучка между отдельными частями ускорителя осуществляется каналами транспортировки пучка, а именно: низкоэнергетическим между источником и ПОКФ, а также двумя среднеэнергетическими каналами между ускоряющими структурами. После ускорения пучок направляется на перезарядную мишень по высокоэнергетическому каналу транспортировки пучка.

АСУ ЛПИТИ предназначена для автоматизированного удаленного управления источником тяжелых ионов. ЛПИТИ предназначен для формирования и начального ускорения импульсных пучков тяжелых ионов, с типами ионов от Na до Bi, интенсивностью ионного пучка от до 3 частиц в импульсе, с длительностью импульса 5 мкс и частотой повторения импульсов до 1 Гц.

Источник тяжелых ионов

Основными компонентами ЛПИТИ являются: двухмодульный импульсно-периодический CO₂ лазерный драйвер, генерирующий мощный импульс оптического излучения; мишенные камеры, в которых находятся мишени, разбитые на сектора с заданным набором материалов; и система экстракции ионного пучка в ускоряющую структуру ЛУ2. Для реализации оперативной перестройки источника на различные сорта ионов ЛПИТИ включает две мишенные камеры с разным набором материалов мишени. Упрощенная блок-схема источника тяжелых ионов приведена на рис. 1.

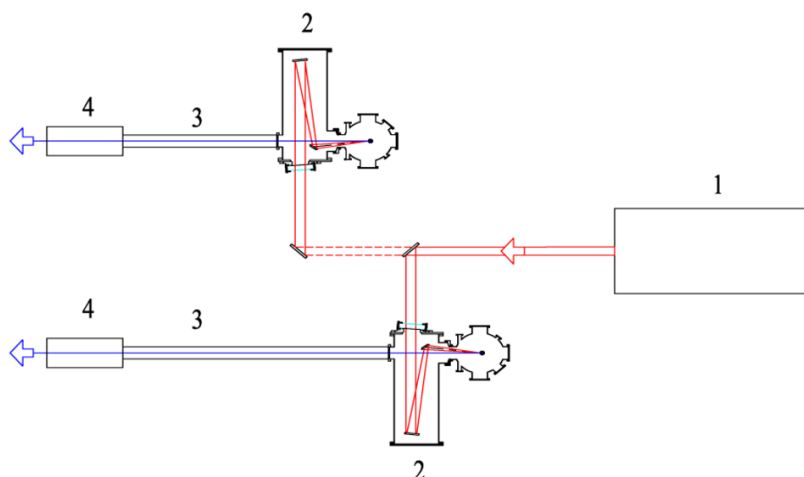


Рис. 1. Структура источника тяжелых ионов: 1 – лазерный драйвер; 2 – вакуумная мишенная камера; 3 – дрейфовая труба; 4 – система экстракции

Fig. 1. Structure of the heavy ion source. 1 – laser driver; 2 – vacuum target chamber; 3 – drift tube; 4 – extraction system

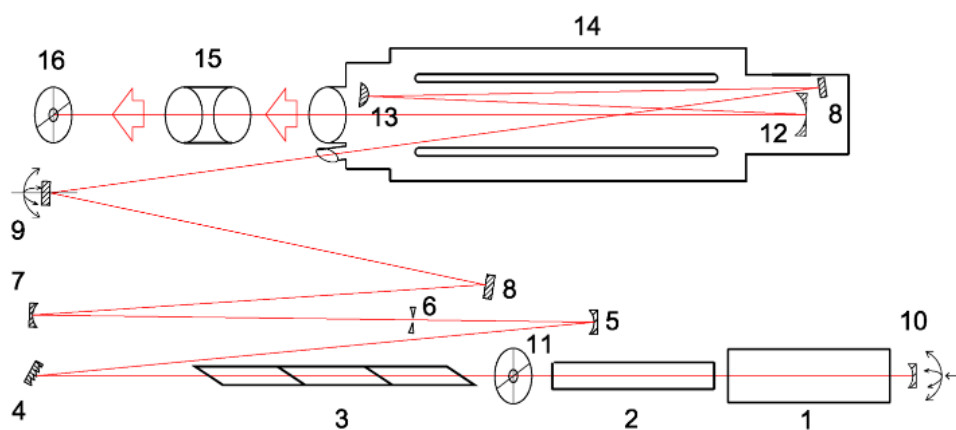


Рис. 2. Блок-схема оптического канала лазерного драйвера: 1 – атмосферный модуль (АМ) задающего генератора (ЗГ); 2 – трубка низкого давления (ТНД); 3 – многосекционная поглощающая ячейка (ПЯ1); 4 – дифракционная решетка; 5, 7 – конфокальная пара сферических зеркал; 6 – диафрагма пространственного фильтра; 8 – плоские зеркала; 9 – плоское зеркало с управляемыми угловыми подвижками; 10 – сферическое зеркало резонатора ЗГ с управляемыми угловыми и линейной подвижками; 11, 16 – датчик положения луча; 12, 13 – зеркала конфокального телескопа; 14 – широкоапертурный усилительный модуль (ШУМ); 15 – полноапертурная поглощающая ячейка (ПЯ2)

Fig. 2. Block diagram of the optical channel of the laser driver. 1 – atmospheric module of the master oscillator; 2 – low pressure tube; 3 – multi-section absorbing cell; 4 – diffraction grating; 5, 7 – confocal pair of spherical mirrors; 6 – spatial filter aperture; 8 – flat mirrors; 9 – flat mirror with controlled angular tuning; 10 – spherical mirror of the resonator with controlled angular and linear tuning; 11, 16 – beam position sensor; 12, 13 – confocal telescope mirrors; 14 – wide aperture amplifier module; 15 – full aperture absorption cell

Основными модулями лазерного драйвера являются: задающий генератор (ЗГ), резонансно-поглощающие ячейки, широкоапертурный усилитель мощности (ШУМ), и каналы транспортировки оптического импульса с пространственным фильтром. Блок-схема оптического канала лазерного драйвера показана на рис. 2.

Задающий генератор предназначен для генерирования лазерного импульса с энергией более 50 мДж и длительностью на полувысоте $75 \div 100$ нс. Лазерный импульс формируется в газовой смеси внутри вакуумных объемов ЗГ – атмосферного модуля и трубки низкого давления под действием высоковольтного электрического разряда.

Оптический импульс с ЗГ, пройдя 3-секционную поглощающую ячейку и пространственный фильтр, усиливается в газовой среде рабочей камеры 4-проходного широкоапертурного усилителя мощности под действием мощных электрических разрядов.

Излучение лазерного драйвера с помощью системы зеркал транспортируется к вакуумной камере, в которой находится мишень, и фокусируется на мишени. Выбываемая из мишени плазма экстрагируется в канал ускоряющей структуры инжектора системой электродов с согласующей ионной оптикой.

Основные технические решения при создании АСУ ЛПИТИ

Основные требования к АСУ ЛПИТИ

Система управления АСУ ЛПИТИ создается как часть автоматизированной системы управления линейным ускорителем ионов ЛУ2 и всего ускорительного комплекса. С точки зрения требований к АСУ ЛПИТИ это означает требование обеспечения возможности удаленного управления источником тяжелых ионов как с местного пульта управления ЛУ2, находящегося в непосредственной близости от лазерного источника, в режиме наладки работы оборудования, так и удаленного управления ионным источником с центрального пульта управления ускорительного комплекса в штатном режиме работы синхротрона. Это также предполагает требование обеспечения совместимости с внешним интерфейсом управления к шине данных верхнего уровня АСУ ЛУ2. С точки зрения реализации АСУ ЛПИТИ, это предполагает использование в ней типовых для всей системы технологических решений организации процессорного управления, сетевой иерархической структуры и программного обеспечения.

Организация сети управления должна быть разработана с учетом влияния мощных электромагнитных помех, которые могут возникать при работе лазерного драйвера. Наконец, выбор архитектуры АСУ должен соответствовать многоуровневой иерархической структуре ЛПИТИ.

Структура АСУ ЛПИТИ

Выбор структуры АСУ основывался на следующих требованиях: она должна соответствовать иерархической многоуровневой структуре ЛПИТИ, учитывать пространственное расположение основных модулей и систем источника и обеспечивать возможность работы в условиях влияния мощных электромагнитных помех, могущих возникать при работе лазерного драйвера. В связи с этим АСУ ЛПИТИ имеет иерархическую многоуровневую архитектуру (рис. 3) и состоит из нескольких основных подсистем.

Набор вычислительных устройств, находящийся в стойке на местном пульте управления, имеет шлюз к АСУ ЛУ2, принимающий команды от системы управления линейным ускорителем, и выдающим на нее диагностическую информацию. По одноранговой сети передачи данных, которая является шиной данных верхнего уровня АСУ ЛПИТИ, он выдает команды на модули управления следующими основными подсистемами лазерного источника: задающим генератором, оптическим каналом, широкоапертурным усилителем мощности и двумя мишенными камерами (МК1 и МК2), содержащими два разных набора материалов мишени.

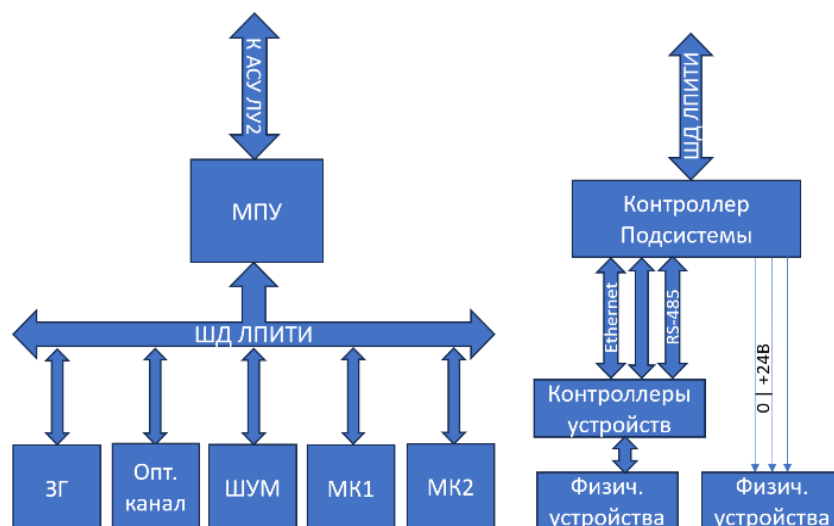


Рис. 3. Иерархическая структура системы управления
Fig. 3. Hierarchical structure of the control system

Местный пульт управления

В помещении местного пульта управления (МПУ) находятся: стойка управления, содержащая шлюз к АСУ ЛУ2 (или центральный процессорный модуль АСУ ЛПИТИ), и интерфейсы операторов местного пульта управления.

Центральный процессорный модуль АСУ ЛПИТИ используется как интерфейс к системе управления ЛУ2, как интерфейс к местному пульту управления источником и как центральный контроллер, выполняющий высокоуровневые команды с АСУ ЛУ2, такие как смена типа ионов в выходном ионном пучке. По шине данных верхнего уровня системы управления источником передаются такие команды и данные, как задание режима работы отдельных подсистем источника и диагностическая информация о работе этих подсистем.

Протокол работы ионного источника сохраняется в архивной базе данных АСУ ЛПИТИ. База данных расположена на отдельном сервере, доступном по шине данных верхнего уровня АСУ ЛПИТИ. Архивная база данных используется как для работы некоторых алгоритмов управления источником, таких как система автоматической подстройки оптической длины ЗГ, так и для последующего статистического анализа данных о работе источника.

Для обеспечения работы в условиях возможности возникновения мощных электромагнитных помех от лазерного драйвера в качестве интерфейса передачи данных по шине данных АСУ ЛУ2 выбран оптический Ethernet с частотой передачи 1 Гбит/с, транспортным протоколом TCP/IP и высокоуровневым протоколом передачи и кодирования данных, используемом в АСУ ЛУ2. Для синхронизации обмена данными с тактовым импульсом на ЛПИТИ на модули управления каждой из подсистем с МПУ по оптическому интерфейсу передаются также и тактовые импульсы от системы синхронизации МЦКИ.

Структура отдельных подсистем управления

Управление лазерным источником ионов заключается в согласованном удаленном управлении отдельными установками ЛПИТИ и их подсистемами. АСУ ЛПИТИ включает набор контроллеров, управляющих работой отдельных установок и подсистем источника. Каждый из контроллеров непосредственно управляет всеми необходимыми отдельными исполнительными устройствами подответственной установки или подсистемы и считывает диагностические показания с их датчиков. Работа каждого из контроллеров организована так, чтобы

он имел возможность управлять соответствующей подсистемой максимально автономно, минимизируя необходимость внешнего вмешательства для организации цикла работы с управляемой установкой.

Структура подсистем управления ЛПИТИ также выбиралась исходя из возможности работы в условиях мощных электромагнитных помех. Каждый из модулей управления отдельной подсистемой лазерного источника содержит защищенную от электромагнитных помех стойку управления, в которой находится контроллер, управляющий работой соответствующей подсистемы. Каждый контроллер по оптическому интерфейсу Ethernet принимает команды от шлюза к АСУ ЛУ2, передает команды, принимает диагностическую информацию от набора контроллеров физических устройств соответствующей подсистемы источника и устанавливает уровни логических сигналов управления отдельными устройствами подсистемы. Команды между стойкой управления и контроллерами физических устройств передаются по оптическим интерфейсам: RS-485 или Ethernet, в зависимости от интерфейса управления соответствующего контроллера физического устройства. Уровни медленных логических сигналов устанавливаются по кабелям, находящимся в защищенных от электромагнитных помех кабельных каналах. Положение стоек управления выбирается таким образом, чтобы длина кабельных каналов была минимальной. Электронное оборудование в стойках управления защищается от электромагнитных помех, могущих генерировать в кабелях логических сигналов высоковольтные электрические импульсы специализированными модулями подавления помех.

Каждая стойка управления содержит типовой набор стандартных электронных устройств: контроллеры управления физическими устройствами подсистемы с модулями расширения (один или несколько); маршрутизатор, передающий команды от ЦПУ АСУ; медиаконвертеры – оптические преобразователи для интерфейсов Ethernet, RS-485 или тактовых сигналов; модули защиты от электромагнитных помех на шинах управления уровнями логических сигналов; трехфазный сетевой фильтр и блоки питания контроллеров. Кроме того, в каждой стойке управления предусмотрена система управления питанием контроллеров, управляемая логическим сигналом, передающимся на стойку управления от МПУ по оптическому интерфейсу, позволяющую при необходимости перезапустить программы управления контроллеров; в стойке управления МПУ, соответственно, находится специализированный контроллер управления системой питания контроллеров подсистем ЛПИТИ.

Элементная база для контроллеров системы управления выбиралась в соответствии с требованиями максимального использования стандартного оборудования. В соответствии с этим везде, где это было возможно, в качестве контроллеров подсистем должны использоваться стандартные модульные программируемые логические контроллеры с соответствующими модулями расширения для управления исполнительными устройствами источника. Однако там, где предлагаемый набор модулей расширения не обеспечивал необходимый интерфейс к исполнительным устройствам, или там, где доступные ПЛК не предоставляли требуемый набор вычислительных возможностей, разрабатывались специализированные контроллеры отдельных подсистем. В качестве коммуникационного модуля для контроллеров использовался модуль Ethernet. Так как выбор ПЛК с оптическим коммуникационным модулем Ethernet сильно ограничивал доступный набор ПЛК, то для всех случаев в качестве интерфейса к оптическому гигабитному Ethernet использовались отдельные медиаконвертеры.

Суммируя набор решений, выбранных в целях выполнения требований по стандартизации используемого оборудования, перечислим основные принятые схмотехнические решения. В качестве контроллеров оборудования, обеспечивающих выполнение возложенных на них задач и способных работать в условиях электромагнитных помех, выбраны контроллеры Delta серии DVP-SE [3] с соответствующими набором модулей расширения – дополнительных входных/выходных логических сигналов, каналов с интерфейсом RS-485/232 и каналов АЦП. Обзор доступных контроллеров физических устройств лазерного источника показал, что их можно подобрать такими, чтобы они имели только два типа интерфейсов к контроллерам в стойке

управления: RS-485/232 или Ethernet. Для унификации требований к контроллерам в стойке управления для всех устройств, управляемых уровнем логического сигнала, выбраны устройства с уровнями логического сигнала 0 $\leftrightarrow$ 24 В. Для устройств, требующих некоторой более сложной обработки данных и/или контроллеры которых имеют специфические интерфейсы, такие как USB, было принято решение использовать промежуточные контроллеры (между контроллерами физических устройств и контроллерами в стойке управления) на базе одноплатных компьютеров. Среди одноплатных компьютеров со сходными характеристиками от нескольких производителей выбор был остановлен на контроллерах Orange Pi [4] из-за наличия в них микросхем флеш-памяти с образом операционной системы компьютера, установленной на плате контроллера, в дополнении к возможности запуска операционной системы с SD-карты и большого набора возможных для установки операционных систем. Контроллеры отдельных устройств, таких как датчики положения лазерного импульса, измерители его энергии, или пьезотюнеры, должны быть смонтированы в металлическом корпусе, защищающем находящееся в нем оборудование от электромагнитных помех; в каждом из таких корпусов находится однотипный набор стандартного оборудования, включающий: контроллер управления физическим устройством, одноплатный компьютер, медиаконвертеры и конвертеры интерфейсов Ethernet или RS-485, приемник-конвертер оптического тактового сигнала, блок питания с разными номиналами выходных напряжений на контроллеры/конвертеры и однофазный сетевой фильтр.

Список литературы

1. **Завьялов Н. В.** Исследовательские установки РФЯЦ – ВНИИЭФ для экспериментального получения фундаментальных и прикладных знаний в области ядерной, радиационной физики и физики быстропротекающих процессов // УФН. 2022. Т. 192 (5). С. 547–563. DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2020.12.038933>
2. **Kulevoy T. V. et al.** Optimization of the Master Oscillator Laser Beam Parameters in the Multi-Pass Amplifier // Proceeding of RUPAC2021, Alushta, Russia, 2021. P. 327–329.
3. <https://www.deltaww.com/en-us/products/PLC-Programmable-Logic-Controllers/243>
4. <http://www.orangepi.org/html/hardWare/computerAndMicrocontrollers/details/Orange-Pi-5B>.

References

1. **Zavyalov N. V.** RFNC—VNIIEF research facilities aimed at experimental acquisition of basic and applied knowledge in the fields of nuclear, radiation, and fast-process physics // Phys. Usp. 65 507–522 (2022). DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2020.12.038933>
2. **Kulevoy T. V. et al.** Optimization of the Master Oscillator Laser Beam Parameters in the Multi-Pass Amplifier // Proceeding of RUPAC2021, Alushta, Russia, 2021. Pp. 327–329.
3. <https://www.deltaww.com/en-us/products/PLC-Programmable-Logic-Controllers/243>
4. <http://www.orangepi.org/html/hardWare/computerAndMicrocontrollers/details/Orange-Pi-5B>.

Сведения об авторах

Барабин Сергей Викторович, ведущий инженер-физик

Лякин Дмитрий Александрович, ведущий инженер-электроник

Орлов Андрей Юрьевич, инженер-электроник

Лосев Антон Андреевич, младший научный сотрудник

Хрисанов Игорь Александрович, младший научный сотрудник

Шумшуров Александр Викторович, кандидат физико-математических наук, начальник установки

Сатов Юрий Алексеевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник

Козлов Александр Владимирович, главный инженер линейных ускорителей

Кулевой Тимур Вячеславович, доктор технических наук, зам. руководителя ККТЭФ по прикладным научным исследованиям и экспериментальным установкам

Information about the Authors

Sergey V. Barabin, Leading Engineer-Physicist

Dmitry A. Liakin, Leading Electronics Engineer

Andrey Y. Orlov, Electronics Engineer

Anton A. Losev, Junior Researcher

Igor A. Chrisanov, Junior Researcher

Alexandr V. Shumshurov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

Yury A. Satov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Lead Researcher

Alexander V. Kozlov, Chief Linear Accelerator Engineer

Timur V. Kulevoy, Doctor of Technical Sciences, Deputy Head of KCTEP for Applied Scientific Research and Experimental Installations

*Статья поступила в редакцию 11.09.2023; одобрена после рецензирования 20.09.2023;
принята к публикации 26.02.2024*

*The article was submitted 11.09.2023; approved after reviewing 20.09.2023;
accepted for publication 26.02.2024*

Научная статья

УДК 621.039.83

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-25-37

Сопровождение облучений ионами углерода при проведении радиобиологических экспериментов на установке РБС*

**Дмитрий Анатольевич Васильев¹, Андрей Валериевич Кошелев²
Владимир Иванович Ковальцов³, Александр Вениаминович Лутчев⁴
Сергей Васильевич Маконин⁵, Владимир Александрович Пикалов⁶
Михаил Константинович Полковников⁷**

Институт физики высоких энергий им. А. А. Логунова
НИЦ «Курчатовский институт», Протвино, Россия

¹Dmitry.Vasiliev@ihep.ru

²Andrey.Koshelev@ihep.ru

³Vladimir.Kovaltsov@ihep.ru

⁴Alexander.Lutchev@ihep.ru

⁵mc_conins@rambler.ru

⁶Vladimir.Pikalov@ihep.ru

⁷Mikhail.Polkovnikov@ihep.ru

Аннотация

Установка РБС с 2015 г. работает в каждом сеансе ускорительного комплекса У-70. Основными пользователями являются радиобиологи и медики. Направление исследований – радиобиологические эксперименты на выведенных пучках ускоренных ионов углерода и предклинические исследования, направленные на разработку отечественных методик ионно-лучевой терапии. Требования, предъявляемые к сопровождению облучений образцов ионами углерода, очень высокие: равномерность облучения не хуже 95 %, точность позиционирования не хуже 0,1 мм, точность отпуска дозы не хуже $\pm 2,5$ %. В статье описаны приборы и устройства, которые используются при сопровождении радиобиологических экспериментов на установке РБС: плоскопараллельная ионизационная камера, мозаичная ионизационная камера, водный фантом с 3D-системой перемещения, 6-координатный стол, дегрейдер, лазерная система позиционирования, клинические дозиметры. Описаны программы для работы с этим оборудованием и архивирования полученных результатов.

Ключевые слова

ионы углерода, пучок, ионизационная камера, дегрейдер, коллиматор, радиобиология, программное обеспечение

Для цитирования

Васильев Д. А., Кошелев А. В., Ковальцов В. И., Лутчев А. В., Маконин С. В., Пикалов В. А., Полковников М. К. Сопровождение облучений ионами углерода при проведении радиобиологических экспериментов на установке РБС // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 3. С. 25–37. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-25-37

*Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

Monitoring and Control of Irradiation with Carbon Ions During Radiobiological Experiments at the RBS Experimental Set-Up

Dmitry A. Vasiliev¹, Andrey V. Koshelev², Vladimir I. Kovaltsov³
Alexander V. Lutchev⁴, Sergey V. Makonin⁵, Vladimir A. Pikalov⁶
Mikhail K. Polkovnikov⁷

Institute for High Energy Physics named after A. A. Logunov
of National Research Center “Kurchatov Institute”

Protvino, Russian Federation

¹Dmitry.Vasiliev@ihep.ru

²Andrey.Koshelev@ihep.ru

³Vladimir.Kovaltsov@ihep.ru

⁴Alexander.Lutchev@ihep.ru

⁵mc_conins@rambler.ru

⁶Vladimir.Pikalov@ihep.ru

⁷Mikhail.Polkovnikov@ihep.ru

Abstract

The RBS experimental set-up has been working in every accelerator session of the U-70 accelerator complex since 2015. The main users of the set-up are radiobiologists and physicians. The direction of research is radiobiological experiments with extracted beams of accelerated carbon ions and preclinical studies aimed at the development of domestic methods of ion therapy. The requirements for irradiation of samples with carbon ions are very high: irradiation uniformity is no worse than 95%, positioning accuracy is no worse than 0.1 mm, dose delivery accuracy is no worse than $\pm 2.5\%$. The article describes the instruments and devices that are used to support radiobiological experiments at the RBS installation: a plane-parallel ionization chamber, a mosaic ionization chamber, a water phantom with a 3D movement system, a 6-axis table, a degrader, a laser positioning system, clinical dosimeters. Programs for working with this equipment and archiving the data obtained are described.

Keywords

carbon ions, beam, ionization chamber, degrader, collimator, radiobiology, software

For citation

Vasiliev D. A., Koshelev A. V., Kovaltsov V. I., Lutchev A. V., Makonin S. V., Pikalov V. A., Polkovnikov M. K. Monitoring and control of irradiation with carbon ions during radiobiological experiments at the RBS experimental set-up. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 3, pp. 25–37 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-25-37

Введение

Экспериментальная установка «Радиобиологический стенд (РБС) на ускорителе У-70» создана на базе НИЦ «Курчатовский институт» ИФВЭ, Протвино для проведения радиобиологических и физических экспериментов на выведенном пучке ядер углерода с энергией до 450 МэВ/нуклон. Установка оформлена как центр коллективного пользования. Специалисты из пяти российских институтов участвуют в радиобиологических исследованиях на клеточных структурах и лабораторных животных, а также в экспериментах по ядерной физике и дозиметрии. Изучение влияния ускоренных ядер углерода на опухолевые и здоровые клетки для целей адронной терапии, а также оценки влияния облучения высокоэнергетическими ионами на когнитивные функции человека являются основными целями этих радиобиологических экспериментов [1]. Ниже будут описаны возможности установки РБС по обеспечению точности облучения и позиционирования образцов во время проведения экспериментов.

1. Мозаичная ионизационная камера

Предназначена для измерения профиля поля облучения в каждом цикле вывода пучка ионов углерода.

Сигнальный электрод камеры представляет собой печатную плату, выполненную из фольгированного стеклотекстолита толщиной 200 мкм размером 230×230 мм. Апертура камеры 160×160 мм. Камера представляет собой матрицу из 256 маленьких ионизационных камер

размерами 1×1 см, собранных в матрицу 160×160 мм (рис. 1). Высоковольтный электрод выполнен из полиимидной пленки толщиной 12 мкм с алюминиевым напылением толщиной в десятки ангстрем. Воздушный зазор составляет 3 мм. Камера помещена в алюминиевый корпус, который имеет входное и выходное окна, закрытые полиимидной пленкой с напылением, что обеспечивает защиту от пыли и внешних воздействий. В этом же корпусе расположена ионизационная камера полного потока апертурой 160×160 мм, позволяющая измерить интенсивность пучка. Рабочее вещество – воздух при атмосферном давлении.

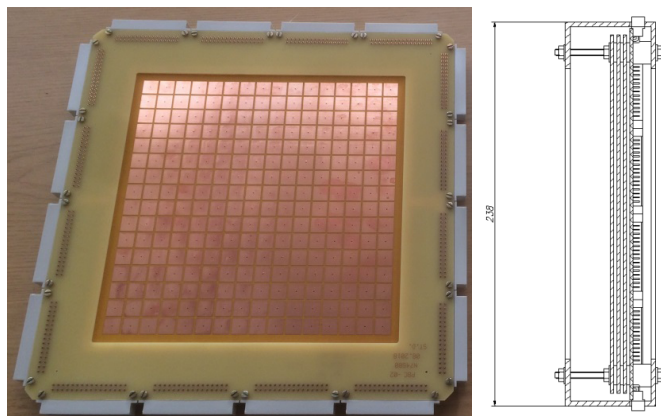


Рис. 1. Сигнальный электрод матричной ионизационной камеры и камера в разрезе
Fig.1. Signal electrode of the matrix ionization chamber and sectional view of the chamber

В качестве электроники нижнего уровня используются разработанные и изготовленные в ИФВЭ модули интеграторов на основе микросхем ACF2101 с контроллером каркаса в непосредственной близости от камеры.

Для обеспечения измерения 256 каналов используются две корзины по 8 интегрирующих модулей в каждой, соединенные последовательно по интерфейсу RS-485.

2. Плоскопараллельная ионизационная камера

Для оценки дозы при облучении объектов изготовлена четырехззорная воздушная плоскопараллельная ионизационная камера с апертурой $\varnothing 50$ мм. Конструктивно камера представляет собой набор из четырех пар электродов с воздушным зазором 2 мм, набранных в единую сборку (рис. 2).

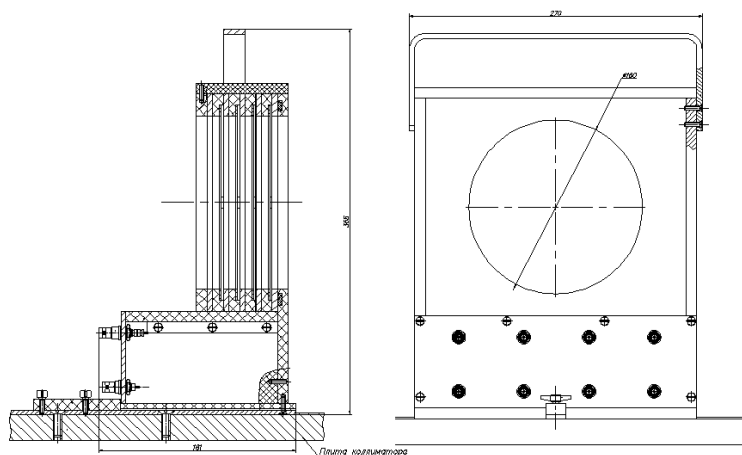


Рис. 2. Плоскопараллельная ионизационная камера
Fig. 2. Plane-parallel ionization chamber

Электроды выполнены методом вакуумного напыления меди на полиимидную пленку. Корпус камеры выполнен из капролона и имеет в основании продольный паз для однозначного крепления в коллиматоре, где она устанавливается. Центр камеры находится строго по оси пучка.

3. Контроллер ионизационных (дозных) камер

Контроллер предназначен для обработки токовых сигналов с зазоров ионизационных камер. Токковый сигнал с ионизационной камеры преобразуется в число импульсов с использованием микросхемы AD652 (ПТЧ). Один импульс соответствует определенному кванту заряда. Измерение числа импульсов в режиме реального времени позволяет измерить дозу и остановить вывод пучка по накоплению заданной величины дозы.

Контроллер выполнен в конструктиве Евромеханика.

Контроллер имеет:

- 4 входных канала измерения тока с ионизационных камер;
- вход сигнала начала вывода пучка;
- релейный выход (сухой контакт, нормально разомкнутый) разрешения вывода пучка. При включении контроллера или при отсутствии питания релейный выход разомкнут.
- интерфейс цифровой связи USB;
- гальванически развязанный интерфейс RS-232/RS-485;
- гальванически развязанный интерфейс CAN;
- светодиодную индикацию работы цифровых интерфейсов и микросхем ПТЧ.

Принцип работы контроллера ПТЧ представлен на рис. 3. По входному сигналу начала вывода пучка (синхроимпульс системы вывода) осуществляется измерение дозы в течение заданного времени t_1 (чуть большего, чем реальное время вывода). В момент времени t_2 начинается измерение шумов измерительного канала в течение времени, равного времени измерения дозы. Следующий цикл измерения начинается по входному сигналу начала вывода пучка (момент времени t_4).

Реальная доза за сброс определяется вычитанием результата измерения шумов из результата измерения дозы.



Рис. 3. Принцип работы контроллера ПТЧ
Fig.3. Operating principle of the controller of the CFC

В режиме вывода заданной дозы с периодом в 1 мс происходит вычисление суммарной дозы и выдача запрета вывода пучка при достижении заданной величины с учетом времени реакции системы вывода.

В среде NI LabView разработано ПО для работы с контроллером.

4. Обработка, хранение и предоставление информации

Обработка информации происходит на компьютере верхнего уровня под управлением операционной системы LinuxFedora 14 в программе PANEL25, написанной для этих целей. Интерфейс программы (рис. 4) имеет необходимый набор инструментов для оценки и отображения результатов измерений и архивации данных.

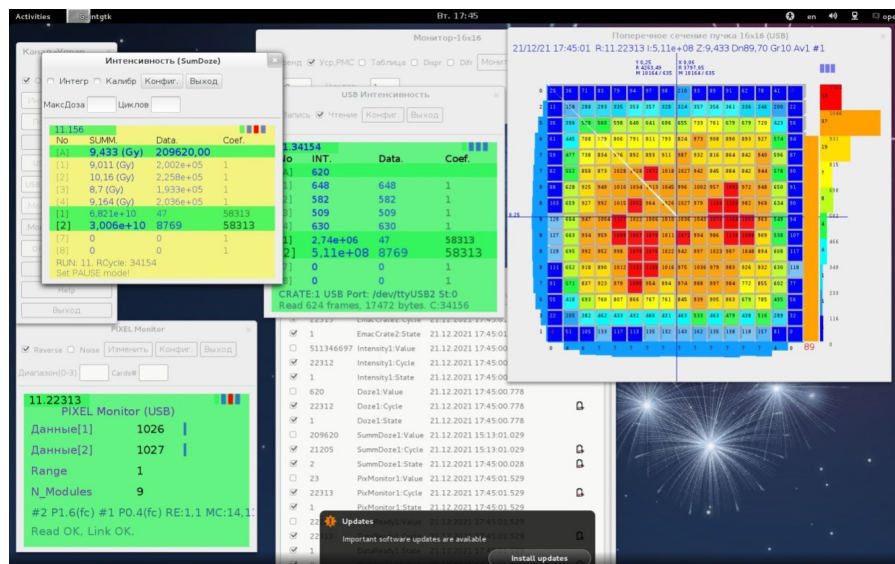


Рис. 4. Внешний вид интерфейса программы мониторинга углеродного пучка
Fig. 4. External view of the interface of the carbon beam monitoring program

Программное обеспечение сбора данных и визуализации состоит из набора сервисов, обменивающихся данными посредством механизма общей памяти процессов ОС Linux, а также общей базы данных. Сервисы в системе:

- сервис приема и архивации измерений интенсивности пучка;
- сервис приема и архивации данных профиля пучка;
- сервис передачи измерений на верхний уровень по стандарту OPC UA (Unified Architecture) [2];
- сервисы визуализации измерений интенсивности, дозы и профиля пучка.

Сервисы сбора данных взаимодействуют с соответствующими модулями связи, входящими в состав электроники измерительной системы. Используются протоколы обмена данными, обеспечивающие надежную передачу и прием данных в формате кадров сообщений. Кадр содержит уникальную сигнатуру данных, адресную информацию источника данных, код типа данных в кадре, длину сообщения, собственно данные измерений, а также контрольную сумму кадра. В случае искажения данных при передаче сообщения, что обнаруживается по величине его контрольной суммы, производится запрос на повторную передачу кадра (до трех попыток). Корректно принятые данные записываются в общую память процессов и в несколько таблиц базы данных: таблица для записей интенсивности, таблица для записей профиля, таблица циклов ускорителя, диагностическая таблица.

Используется БД sqlite-3 [3], доступ к таблицам БД на чтение и запись реализуется с помощью открытой двоичной библиотеки sqlite.lib. В каждом рабочем сеансе ускорителя ИФВЭ создается новая БД при сохранении БД всех предшествующих сеансов.

Данные, полученные в каждом цикле ускорителя, передаются на верхний уровень системы контроля и управления ускорителем по стандарту OPC UA. Сюда входят измерения

интенсивности и профиля пучка (все 256 точек). Сервис передачи данных является сервером OPC UA.

Сервис визуализации данных представляет измерения, полученные в каждом цикле ускорителя, в виде нескольких графических окон (рис. 4). Таким же образом можно просматривать исторические (ранее полученные) данные на любую глубину.

Профиль пучка отображается в матричной форме, каждый элемент которой имеет цветность, зависящую от величины заряда в нем. Центр тяжести профиля отображается пересечением двух линий – центров по горизонтали и вертикали. В правой части располагается гистограмма распределения интенсивности. В верхней части окна показаны текущая интенсивность, отклонение центра тяжести от геометрического центра матрицы, среднеквадратичное отклонение по распределению интенсивности в профиле, суммарный и средний заряд по 256 точкам. Слева и снизу окна показаны профили пучка по оси X и Y соответственно.

5. Водный фантом с 3D-системой перемещения

Водный фантом с 3D-системой перемещения кессона предназначен для проведения радиобиологических экспериментов и измерения параметров пучка ионов углерода. 3D-система перемещения кессона в водном фантоме реализована на основе настольного фрезерного станка с ЧПУ BZT-PF600. Перемещение осуществляется тремя шаговыми двигателями с разрешением 2,5 мкм и максимальной скоростью позиционирования 8000 мм/мин. Система оборудована концевыми выключателями начального положения, кнопкой аварийного останова и блокировки перемещения. Управляющая электроника станка ЧПУ заменена специально разработанным контроллером с интерфейсами и протоколом, позволяющими интегрировать данную подсистему в общую информационную систему РБС.

Блок-схема устройства представлена на рис. 5.

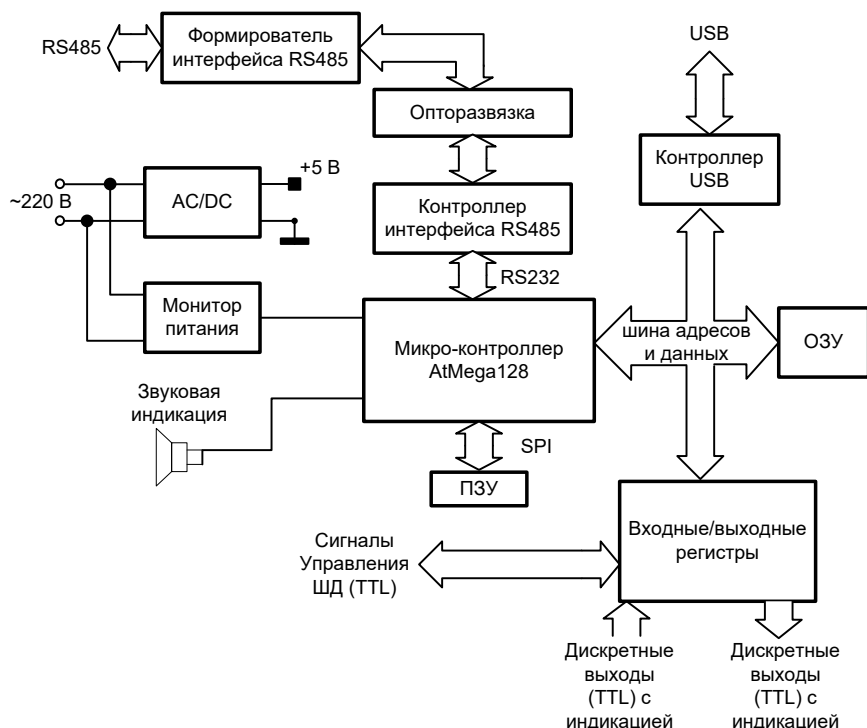


Рис. 5. Блок-схема прибора ШД-РБС
Fig. 5. Block diagram of the SM-RBS device

Основными функциями блока управления являются:

- выдача дискретных сигналов на управление тремя шаговыми двигателями согласно загруженному профилю движения (ось перемещения, направление, начальная и максимальная скорости, ускорение, целевая позиция);
- чтение и обработка концевых выключателей на каждой оси;
- чтение и обработка нажатия кнопки аварийного останова;
- контроль питающего напряжения 220 В;
- вычисление текущей координаты по каждой оси;
- останов движения по команде;
- останов движения и сохранение текущих координат при пропадании питающего напряжения;
- организация связи с ПК верхнего уровня по интерфейсам USB и RS485.

В среде NI Labview разработано программное обеспечение для ПК, позволяющее управлять работой блока как локально (по интерфейсу USB), так и удаленно (по интерфейсу RS-485).

6. Клинические дозиметры ДКС-АТ и UNIDOS PTW

Клинические дозиметры ДКС-АТ 5350/1 и UNIDOS имеют последовательные интерфейсы RS-232 для подключения типа точка-точка к персональному компьютеру. Протоколы обмена данными для каждого из дозиметров свои. Оба протокола позволяют не только вычитывать величину накопленной дозы с прибора, но и осуществлять запуск и останов режима накопления. В среде NI Labview 2012 разработано программное обеспечение для ПК, позволяющее дистанционно управлять работой дозиметров этих типов.

На основе водного фантома, клинических дозиметров и плоскопараллельных ионизационных камер создан программно-аппаратный комплекс для поиска пика Брэгга в автоматическом режиме.

Для этого использованы следующие подпрограммы:

- управление перемещением кессона в заданную точку водного фантома;
- чтение и контроль суммарной интенсивности, измеренной ионизационной камерой перед водным фантомом;
- запуск режима накопления клинического дозиметра, чтение накопленной дозы, сброс дозиметра.

При синхронизации запуска измерений с циклом работы ускорительного комплекса не запрещается вывод пучка. Синхронизация измерений с циклом работы ускорительного комплекса также осуществляется через OPC UA-сервер: после окончания вывода пучка данные с ионизационной камеры обновляются, это сопровождается меткой времени. Циклический полинг метки времени позволяет определить момент окончания вывода пучка с задержкой не более 1 с.

В среде NI Labview разработана общая управляющая программа, запускающая и синхронизирующая работу вышеописанных программ. Алгоритм работы программы следующий:

- формирование задания: указание начальной координаты, конечной, величины шага, суммарной величины интенсивности. Результатом выполнения является массив координат по продольной оси пучка, в которых необходимо провести измерения;
- запуск процедуры автоматического поиска пика Брэгга;
- позиционирование в каждой координате; запуск режима накопления дозиметра ДКС-АТ (PTW UNIDOS), набор заданного числа событий по данным с ионизационной камеры перед водным фантомом, расчет величины удельной дозы, передача величины накопленной дозы в OPS UA-сервер информационной системы РБС;
- построение графика зависимости величины удельной дозы от координаты;
- архивация измеренных и вычисленных данных;
- после выполнения задания возможно формирования следующего.

Предусмотрена возможность управления положением кессона в водном фантоме в поперечном и вертикальном направлении. Это требуется для корректировки положения облучаемого объекта.

Также разработана программа, позволяющая считывать сохраненные архивные данные, отображать на едином графике данные нескольких измерений, вычислять суммарную интенсивность с ионизационной камеры перед водным фантомом для набора заданной величины дозы без дальнейшего использования клинического дозиметра.

Программы используются при проведении радиобиологических экспериментов.

7. Пластинчатый дегрейдер

Пластинчатый дегрейдер предназначен для изменения энергии пучка углерода путем введения в пучок поглотителей из оргстекла и представляет собой несущую металлическую конструкцию, на которой установлены пластиковые пластины, элементы привода, управляющая электроника и источник питания.

Несущая конструкция (шасси) выполнена из алюминия. Все внутренние элементы, установленные на шасси (приводы, электроника и т. д.), закрыты алюминиевыми кожухами и крышками на винтах.

Поглотитель представляет набор из листов органического стекла необходимой толщины. На каждом из листов закреплены нажимные пластины для взаимодействия с концевыми выключателями.

Привод блоков поглотителя состоит из шаговых электродвигателей, компенсирующих муфт, ходовых винтов и направляющих. Ходовые винты и направляющие расположены в шахматном порядке.

В нижней части шасси на кронштейнах установлены концевые выключатели.

На рис. 6 показан пластинчатый дегрейдер без кожуха.

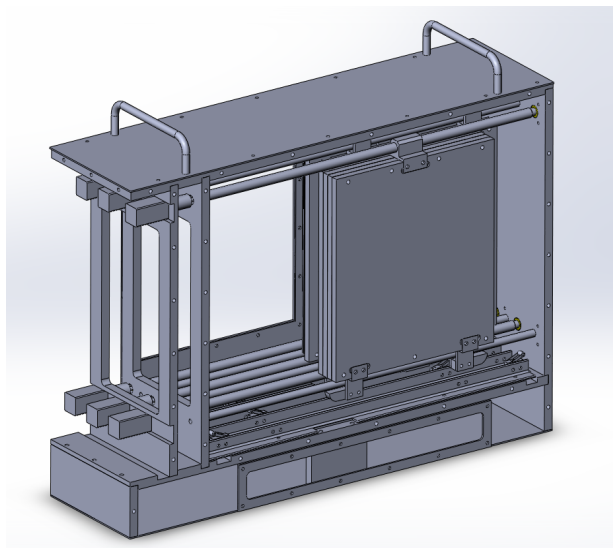


Рис. 6. Пластинчатый дегрейдер без кожуха

Fig. 6. Plate degrader without casing

Для управления перемещением пластинами поглотителя используется встроенный контроллер с последовательным интерфейсом RS-232C. Все данные передаются в виде текстовых сообщений.

Пластины расположены на шести перемещающихся каретках, и каждая каретка перемещается независимо от другой. Толщины пластин в соответствии с номерами кареток показаны в таблице.

Толщины пластин дегрейдера с номерами кареток

Thicknesses of degrader plates with carriage numbers

№ каретки	Толщина пластины (мм)
1	32,4
2	16,15
3	8,15
4	3,68
5	1,66
6	0,98

ПО управления дегрейдером разработано в среде Ni Labview.

8. Программное обеспечение реализации процедуры послойного облучения объекта

Программное обеспечение (ПО) предназначено для послойного облучения объектов пучком ускоренных ядер углерода узким пиком Брэгга заданной энергии. Послойное облучение объектов реализуется пластинчатым дегрейдером путем введения в пучок пластин заданной толщины (кратно ~ 1 мм водного эквивалента). ПО для данного вида облучения разработано и опробовано в осеннем сеансе 2022 г.

Послойное облучение объектов в кессоне водного фантома может также осуществляться перемещением кессона в фантоме.

Доза на каждый слой вычисляется при разработке плана облучения.

Объекты системы управления, реализующие процедуру послойного облучения, следующие:

- пластинчатый дегрейдер, интерфейс подключения – RS-232;
- система перемещения кессона в водном фантоме. Интерфейс подключения контроллера – USB;
- подсистема диагностики пучка (измерение интенсивности), интерфейс подключения – Ethernet, OPC UA;
- контроллер ионизационных (дозных) камер, интерфейс подключения – USB, RS-485. Задействованы два измерительных канала, реализующих измерение сигналов с двух ионизационных камер (определение интенсивности и дозы). В режиме накопления вывод пучка запрещается при достижении заданной величины для каждого слоя.

В среде Ni LabView разработано ПО для реализации послойного облучения объектов с совместным использованием водного фантома и пластинчатого дегрейдера.

Задание формируется нажатием кнопки «Сформировать Задание» в главном окне программы. После этого вручную заносятся величины доз и номера пластин дегрейдера для каждого слоя. Предусмотрена возможность удаления ошибочно введенного слоя и добавление нового слоя на любое место. Выполняется сформированное задание нажатием кнопки «Исполнить Задание». Для контроля сигнала разрешения вывода пучка предусмотрен индикатор. Состояние каждого устройства, используемого при реализации процедуры, отражается под соответствующими столбцами таблицы.

По окончании процедуры в окне программы появляется соответствующее сообщение и возможно задание нового плана облучения.

В весеннем сеансе 2023 г. было проведено послойное облучение заданного объема в водном фантоме с использованием пластинчатого дегрейдера, реальная доза в каждом слое измерялась клиническим дозиметром.

9. 6-координатный стол

В НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ спроектирован и изготовлен 6-координатный стол с рентгено-прозрачной декой. Стол предназначен для точного позиционирования пациента при лучевой терапии относительно фиксированного пучка.

Для обеспечения надежного и безопасного функционирования стола требуемой точности позиционирования и возможности дистанционного и местного управления с включением в общую информационную систему разработана автоматизированная система управления.

Состав оборудования системы управления 6-координатным столом:

- персональный (промышленный) компьютер (PC);
- устройства формирования шины CAN: преобразователи USB-CAN, повторители (шлюзы) шины CAN;
- сервоприводы СПШ – 5 шт.;
- контроллер управления шаговым приводом KUMB-203 с энкодером Kubler Sendix F5668;
- местный ручной пульт управления (манипулятор);

Управление элементами оборудования осуществляется через PC. Блок-схема обмена данным представлена на рис. 7.

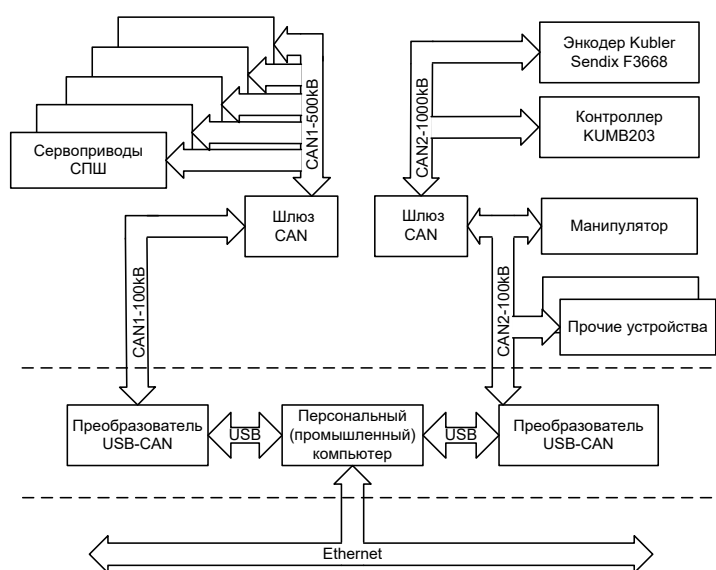


Рис. 7. Блок-схема обмена данными в системе управления столом

Fig. 7. Data exchange flowchart in the table control system

Сервоприводы СПШ обеспечивают следующие перемещения:

- | | |
|---|-----------------|
| • горизонтальное продольное | 1000 мм |
| • горизонтальное поперечное | ± 200 мм |
| • вертикальное | 650 мм |
| • вращение деки относительно горизонтальной оси | $\pm 15^\circ$ |
| • вращение деки относительно вертикальной оси | $\pm 15^\circ$ |
| • круговое движение | $\pm 185^\circ$ |

Для управления элементами оборудования в медицинской зоне РБС в непосредственной близости от стола при первичной укладке пациента разработан ручной пульт управления (манипулятор) со следующими характеристиками:

- наличие CAN-интерфейса для обмена данными с системой управления;
- наличие тактильного устройства при взятии манипулятора в руку;
- наличие интуитивно понятной символьной маркировки функций кнопок;
- предусмотрена возможность работы в условиях частичного затемнения;
- наличие звуковой сигнализации;
- наличие кнопки аварийного останова всех механизмов стола-кресла;
- питание устройства от 15 В постоянного тока.

В среде NI Labview разработана программа управления столом и оборудованием в медицинской зоне РБС. Управление всеми приводами осуществляется через единую таблицу.

Для расчета и визуализации положения пациента на пучке была реализована программа, являющаяся модулем к программе медицинской визуализации и расчетов 3D Slicer. За основу иерархии системы координат элементов был взят стандарт ГОСТ Р МЭК 61217-2013 «Аппараты дистанционные для лучевой терапии. Координаты, перемещения и шкалы», который является переводом стандарта IEC 61217:2011. Данный ГОСТ для аппаратов со штативом, к которому, помимо электронного или фотонного источника, монтируется ряд элементов (многолепестковый коллиматор, выходное окно, рентгеновский детектор). Установка РБС отличается несколькими аспектами:

- фиксированный пучок, параллельный поверхности земли;
- отсутствие МЛК и рентгеновских источников в системе координат пучка.

Учитывая, что требуемая ориентация пучка для пациента в большинстве случаев отлична от горизонтальной, программой позиционирования выполняется перерасчет из ориентации неподвижного пучка в требуемый для пациента путем наклона деки стола и поворота опоры стола.

Реализованная иерархия систем координат представлена на рис. 8. Ось вращения системы опоры стола s пересекается с осью неподвижного пучка g . Переход из материнской системы координат в дочернюю и наоборот осуществляется через матрицу аффинных преобразований и вектора переноса начала системы координат. В качестве данных пациента и координат области облучения и изоцентра программа использует данные формата DICOM модальности СТ и данные оконтуривания RTSTRUCT. Данные ориентации пучков облучения могут быть получены из DICOM файлов RTPlan или RTIonPlan либо введены вручную.



Рис. 8. Иерархическая структура систем координат ГОСТ Р МЭК 61217-2013 в приложении к РБС

Fig. 8. Hierarchical structure of coordinate systems IEC 61217:2011 in the RBS

Для совмещения точки изоцентра, полученной из данных системы планирования, и оси пучка первоначально выполняется расчет и отработка углов деки стола в соответствии с ее кинематической схемой. Поступательные движения опоры стола и деки стола определяются и выполняются после угловых перемещений.

Взаимодействие между программой расчета положения пациента и системой управления элементами перемещения осуществляется по стандарту OPC-UA.

10. Программное обеспечение управления оборудованием в установке РБС

ПО разработано в среде Ni Labview. Внешний вид основного окна программы представлен на рис. 9.

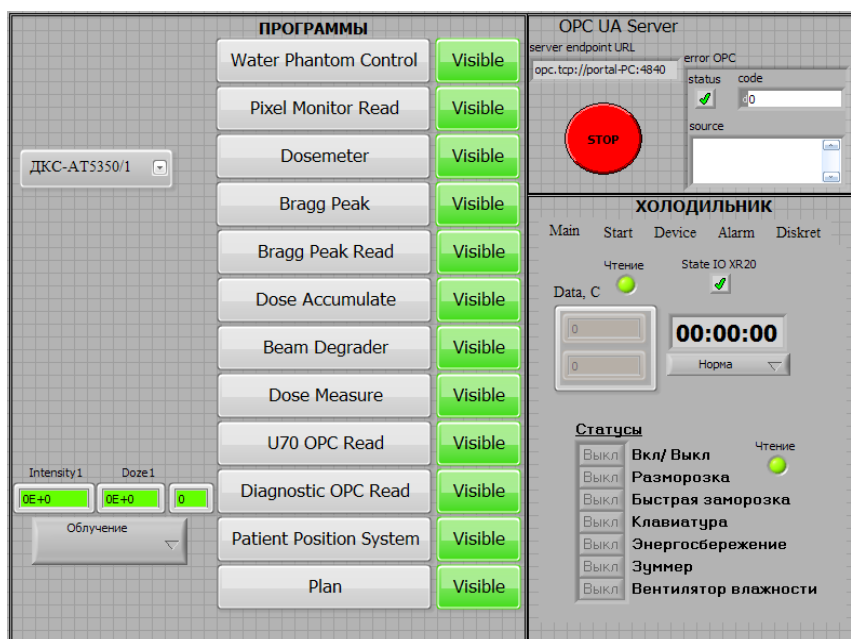


Рис. 9. Внешний вид основного окна программы управления оборудованием установки РБС

Fig. 9. The main window of the RBS set-up equipment control program

Подпрограммы запускаются (закрываются) нажатием соответствующей кнопки на панели управления. При корректной работе соответствующая кнопка окрашивается в зеленый цвет. При наличии ошибок (отсутствие данных, получаемых по сети Ethernet, отсутствие оборудования или выявление неисправностей в его работе) соответствующая кнопка окрашивается в красный цвет. Существует возможность реализации звуковой сигнализации с указанием возникающих неисправностей в процессе работы. Для удобства работы показания величин ионизационных камер (интенсивность и доза) выведены на главный экран.

Список литературы

1. **Pikalov V. A. et al.** Experimental facility “radiobiological test setup on accelerator U-70” as centers for collective use (CCU) // Proceedings of 26th Russian Particle Acc. Conf. RuPAC2018, Ptovino, Russia, 2018. P. 253–255. DOI: 10.18429/JACoW-RUPAC2018-TUPSA50.
2. **Mahnke W., Leitner S.-H., Damm M.** OPC Unified Architecture. Berlin: Springer, 2009.
3. **Sinhsankar Haldar.** SQLite Database System. Design and Implementation. Self-Publishing, 2015.

References

1. **Pikalov V. A. et al.** Experimental facility “radiobiological test setup on accelerator U-70” as centers for collective use (CCU). *Proceedings of 26th Russian Particle Acc. Conf. RuPAC2018*, Ptovino, Russia, 2018, pp. 253–255. DOI: 10.18429/JACoW-RUPAC2018-TUPSA50.
2. **Mahnke W., Leitner S.-H., Damm M.** OPC Unified Architecture. Berlin: Springer, 2009.
3. **Sinbsankar Haldar.** SQLite Database System. Design and Implementation. Self-Publishing, 2015.

Сведения об авторах

Васильев Дмитрий Анатольевич, старший научный сотрудник

Кошелев Андрей Валериевич, старший научный сотрудник

Ковальцов Владимир Иванович, инженер-программист

Лутчев Александр Вениаминович, старший научный сотрудник

Маконин Сергей Васильевич, инженер

Пикалов Владимир Александрович, начальник лаборатории

Полковников Михаил Константинович, старший научный сотрудник

Information about the Authors

Dmitry A. Vasiliev, Senior Researcher

Andrey V. Koshelev, Senior Researcher

Vladimir I. Kovaltsov, Software Engineer

Alexander V. Lutchev, Senior Researcher

Sergey V. Makonin, Engineer

Vladimir A. Pikalov, Head of Laboratory

Mikhail K. Polkovnikov, Senior Researcher

*Статья поступила в редакцию 11.09.2023; одобрена после рецензирования 02.10.2023;
принята к публикации 05.03.2024*

*The article was submitted 11.09.2023; approved after reviewing 02.10.2023;
accepted for publication 05.03.2024*

Научная статья

УДК 614.876

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-38-47

Верификация расчетов защиты медицинской кабины ионно-лучевой терапии канала 26А проекта ЛУЧ У-70*

**Владимир Александрович Пикалов¹, Олег Валентинович Суманеев²
Михаил Михайлович Сухарев³**

Институт физики высоких энергий им. А. А. Логонова
НИИЦ «Курчатовский институт»,
Протвино, Россия

¹Vladimir.Pikalov@ihep.ru

²Oleg.Sumaneev@ihep.ru

³Mikhail.Sukharev@ihep.ru

Аннотация

В настоящее время опыт проектирования установок на выведенных пучках ионов углерода в России (мире) очень ограничен. Медицинская кабина ионно-лучевой терапии канала 26А проекта ЛУЧ У-70 предоставляет уникальную возможность для оценки эффективности биологической защиты и верификации расчетов. В статье представлены данные экспериментальных измерений нейтронного излучения за биологической защитой медицинской кабины. Данные получены для двух энергий выведенного пучка ускоренных ядер углерода – 400 и 450 МэВ/нуклон. Результат сравнивается с расчетом, выполненным по программе FLUKA для данной конфигурации защиты. Показано хорошее соответствие экспериментальных данных и расчета.

Ключевые слова

биологическая защита, ионы углерода, FLUKA, нейтроны

Для цитирования

Пикалов В. А., Суманеев О. В., Сухарев М. М. Верификация расчетов защиты медицинской кабины ионно-лучевой терапии канала 26А проекта ЛУЧ У-70 И // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 3. С. 38–47. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-38-47

*Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

Verification of Calculation for the Protection of the Medical Cabin for Ion Therapy of Channel 26A of the Luch U-70 Project

Vladimir A. Pikalov¹, Oleg V. Sumaneev²
Mikhail M. Sukharev³

Institute for High Energy Physics named after A. A. Logunov
of National Research Center “Kurchatov Institute”
Protvino, Russian Federation

¹Vladimir.Pikalov@ihep.ru

²Oleg.Sumaneev@ihep.ru

³Mikhail.Sukharev@ihep.ru

Abstract

Currently, the experience in designing installations using extracted carbon ion beams in Russia (the world) is very limited. The medical cabin for ion therapy of channel 26A of the LUCH U-70 project provides a unique opportunity for assessing the effectiveness of biological protection and verifying calculations. The paper presents data from experimental measurements of neutron radiation behind the biological protection of a medical cabin. The data were obtained for two energies of the extracted beam of accelerated carbon nuclei – 400 and 450 MeV/nucleon. The result is compared with the calculation performed using the FLUKA program for a given protection configuration. Good agreement between experimental data and calculations is shown.

Keywords

radiation shielding, carbon ions, FLUKA, neutrons

For citation

Pikalov V. A., Sumaneev O. V., Sukharev M. M. Verification of Calculation for the Protection of the Medical Cabin for Ion Therapy of Channel 26a of the Luch U-70 Project. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 3, pp. 38–47 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-38-47

Введение

В настоящее время в России и мире наблюдается высокий интерес к созданию комплексов ионно-лучевой терапии на основе пучков C12. Только в ИФВЭ в настоящее время существует два проекта подобных комплексов ЛУЧ У-70 и ЛУЧ-ТИП. В то же время опыт проектирования таких комплексов ограничен. Отсутствуют методики расчета биологической защиты, мало экспериментальных данных. Для расчета защиты подобных комплексов обычно используются широко известные программы FLUKA [1; 2], MCNPX, RHITS, GEANT4. Тем не менее результаты расчетов по этим программам часто вызывают сомнения, в частности, из-за частого значительного расхождения друг с другом.

Существующая в ИФВЭ установка РБС [3], которая по проекту будет переоборудована в кабину 26А1 ионно-лучевого комплекса ЛУЧ-70, предоставляет уникальную возможность проведения дозиметрических измерений в условиях, максимально приближенных к реальному облучению пациентов. При этом существующие детальные чертежи защиты и расположения оборудования зоны и возможность осмотра и проведения замеров на месте позволяют создать достоверную расчетную модель. Средства диагностики пучка обеспечивают корректное описание источника ионов углерода.

Цель работы – оценка эффективности биологической защиты зоны РБС и верификация расчетов дозовых полей за биологической защитой по программе FLUKA.

Надеемся, что данные результаты окажут помощь при проектировании установок подобного типа.

1. Цель работы

1. Оценка эффективности биологической защиты установки РБС.
2. Верификация расчетов биологической защиты экспериментальных установок, использующих углеродные пучки, по программе FLUKA.

2. Содержание работ

1. Измерение амбиентного эквивалента дозы нейтронов $H_n(10)$ за защитой установки РБС.
2. Расчет амбиентного эквивалента дозы нейтронов $H_n(10)$ и эффективного эквивалента дозы (H_{eff}) по программе FLUKA.

3. Характеристики пучка

Пучок ионов углерода с номинальной энергией (E_0) – 455 и 400 МэВ/нуклон. Раскрытие коллиматора 1 установки РБС – 150×150 мм, (алюминиевые вставки убраны) обеспечивало беспрепятственное прохождение пучка в зону РБС. Воблер-магниты выключены.

4. Источник вторичных нейтронов (мишень)

Прямоугольный фантом, внутренние размеры $33 \times 35 \times 53$ см со стенками из поликарбоната, заполненный водой (фантом ИФВЭ). Толщина боковых стенок и основания – 15 мм, передней и задней стенок – 30 мм. Фантом располагался на столе установки РБС.

5. Средства измерений

Нейтронный дозиметр – ДКС-96 [4] № Д062, свидетельство о поверке № 03-20/С до 06.09.2021.

Дополнительный контроль источника вторичных нейтронов осуществлялся парой мониторов быстрых нейтронов на основе счетчиков СНМ-14, расположенных в зоне установки РБС, в прямой видимости фантома.

6. Условия измерений

Измерения проводились в пяти точках, расположенных за защитой установки РБС на расстоянии 50 см от защиты на уровне пучка, в двух режимах:

- 1) вывод пучка ионов углерода на фантом (in);
- 2) вывод пучка ионов углерода на поглотитель пучка установки РБС (out).

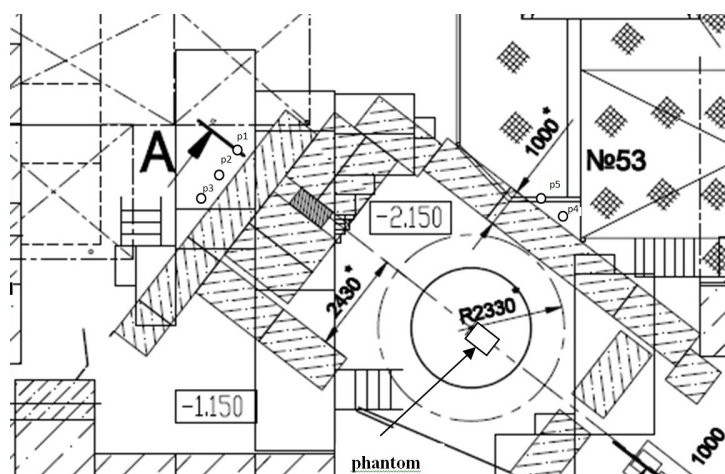


Рис. 1. Расположение точек измерения $H_n(10)$ за защитой зоны РБС
Fig. 1. Location of $H_n(10)$ measurement points behind the protection of the RBS zone

Координаты точек измерения $H_n(10)$ относительно изоцентра (см):

- 1 – $x = 0$, $y = 0$, $z = 798$;
- 2 – $x = 100$, $y = 0$, $z = 798$;

- $3 - x = 200, y = 0, z = 798$;
- $4 - x = -393, y = 0, z = 100$;
- $5 - x = -393, y = 0, z = 200$.

Измерения выполнены двумя сериями:

22.04.2021

$E_0 - 455$ МэВ/нуклон.

Координаты фантома ИФВЭ относительно изоцентра (см):

x, z (центр фантома) – 0, y (верхняя поверхность стола) – при выводе на фантом –20, при выводе на поглотитель –55. Уровень воды – 12.

29.04.2021

$E_0 - 400$ МэВ/нуклон.

Координаты фантома ИФВЭ относительно изоцентра (см):

x, z (центр фантома) – 0, y (верхняя поверхность стола) – при выводе на фантом –22, при выводе на поглотитель –55. Уровень воды – 14.

7. Расчеты

По программе FLUKA выполнены расчеты $H_n(10)$ и H_{eff} , а также спектров нейтронов в условиях измерений.

Конфигурация защиты и полов зоны РБС заданы в соответствии с чертежом № 9530 «Расположение оборудования установки РБС» и результатами непосредственных измерений в зоне.

Энергия и размер пучка ионов углерода на входе в зону РБС были определены по результатам измерений распределения энерговыведения в водном фантоме.

Радиус пучка, $r_0 - 40$ мм.

Энергия пучка: при номинальной 455 МэВ/нуклон – 434 МэВ/нуклон, при номинальной 400 МэВ/нуклон – 378 МэВ/нуклон. RUN – файлы с записью интенсивности в каждом цикле вывода при измерениях.

8. Результаты

1. Результаты измерений дозы нейтронов $H_n(10)$ 22.04.2021 г., RUNS 3–15.

22.04.2021 г. для энергии ионов углерода $E_0 = 455$ (434) МэВ/нуклон в геометрии, описанной на рис. 1, были выполнены измерения дозы нейтронов $H_n(10)$. Данные и результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений дозы нейтронов в точках по рис. 1 и результаты расчетов в этих же точках ($E_0 = 455$ (434) МэВ/нуклон)

Table 1

The results of measurements of the neutron dose at the points in Figure 1 and the results of calculations at the same points ($E_0 = 455$ (434) MeV/nucleon)

RUN	point	date, time	$I \times 10^9$, ions	$H_n(10)$ $\mu\text{Sv/h}$	$H_n(10)$ 10^{-6} pSv/ion	FLUKA 10^{-6} pSv/ion
1	2	3	4	5	6	7
3	1 in	22.04 12:59	7,97	10,5	36,6	55,7
4	2 in	22.04 13:02	7,19	8,08	31,2	45,4
5	3 in	22.04 13:07	8,82	5,50	17,3	26,1
6	4 in	22.04 13:12	9,48	14,0	41,0	56,5
7	5 in	22.04 13:16	9,49	19,1	55,9	81,1

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
9	5 out	22.04 13:30	8,55	1,47	4,77	2,91
10	4 out	22.04 12:33	7,94	1,65	5,77	2,22
13	3 out	22.04 13:47	7,04	2,73	10,7	12,5
14	2 out	22.04 13:50	9,37	6,89	20,6	30,0
15	1 out	22.04 13:54	7,94	8,06	28,2	39,5

2. Результаты измерений дозы нейтронов $H_n(10)$ 29.04.2021 г., RUNS 31–40.

29.04.2021 г. для энергии ионов углерода $E_0 = 400$ (378) МэВ/нуклон в геометрии, описанной на рис. 1, были выполнены измерения дозы нейтронов $H_n(10)$. Данные и результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений дозы нейтронов в точках по рис. 1 и результаты расчетов в этих же точках ($E_0 = 400$ (378) МэВ/нуклон)

Table 2

The results of measurements of the neutron dose at the points in Figure 1 and the results of calculations at the same points ($E_0 = 400$ (378) MeV/nucleon).

RUN	point	date, time	$I \times 10^9$, ions	$H_n(10)$ $\mu\text{Sv/h}$	$H_n(10) 10^{-6}$ pSv/ion	FLUKA 10^{-6} pSv/ion
31	1 in	29.04 11:35	4,26	3,87	25,2	32,9
32	2 in	29.04 11:38	6,27	4,69	20,8	27,6
33	3 in	29.04 11:42	6,20	2,90	13,0	16,1
34	4 in	29.04 11:46	6,21	8,00	35,8	38,6
35	5 in	29.04 11:49	6,10	11,1	50,5	57,6
36	5 out	29.04 11:58	5,86	1,25	5,92	2,31
37	4 out	29.04 12:01	5,78	1,06	5,09	1,87
38	3 out	29.04 12:05	5,38	1,50	7,74	8,24
39	2 out	29.04 12:09	5,47	3,40	17,3	20,0
40	1 out	29.04 12:12	5,79	4,30	20,6	25,5

3. Результаты мониторингования.

При проведении измерений для оценки результатов были использованы мониторы. В качестве мониторов были применены нейтронные дозиметры с разными функциями чувствительности [5] (А и Б). Мониторы были расположены внутри зоны установки РБС и их положение не менялось во время всех измерений. Результаты мониторингования для измерений, выполненных 29.04.2021 г., приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты мониторинга для измерений при $E_0 = 400$ (378) МэВ/нуклон

Table 3

Monitoring results for measurements at $E_0 = 400$ (378) MeV/nucleon

RUN	point	date, time	$I \times 10^9$, ions	monitor A, N_A/I , 10^{-6} counts/ion	monitor B, N_B/I , 10^{-6} counts/ion	NA/NB
31	1 in	29.04 11:35	4,26	2,89	1,00	2,93
32	2 in	29.04 11:38	6,27	2,93	1,01	2,88
33	3 in	29.04 11:42	6,20	2,91	0,99	2,98
34	4 in	29.04 11:46	6,21	2,92	1,00	2,89
35	5 in	29.04 11:49	6,10	2,92	0,98	2,98
36	5 out	29.04 11:58	5,86	1,10	0,46	2,39
37	4 out	29.04 12:01	5,78	1,09	0,46	2,38
38	3 out	29.04 12:05	5,38	1,09	0,44	2,45
39	2 out	29.04 12:09	5,47	1,09	0,45	2,43
40	1 out	29.04 12:12	5,79	1,09	0,45	2,41

Показания мониторов позволяют сделать вывод, что изменение оценки интенсивности и энергии пучка не превышало 3 %.

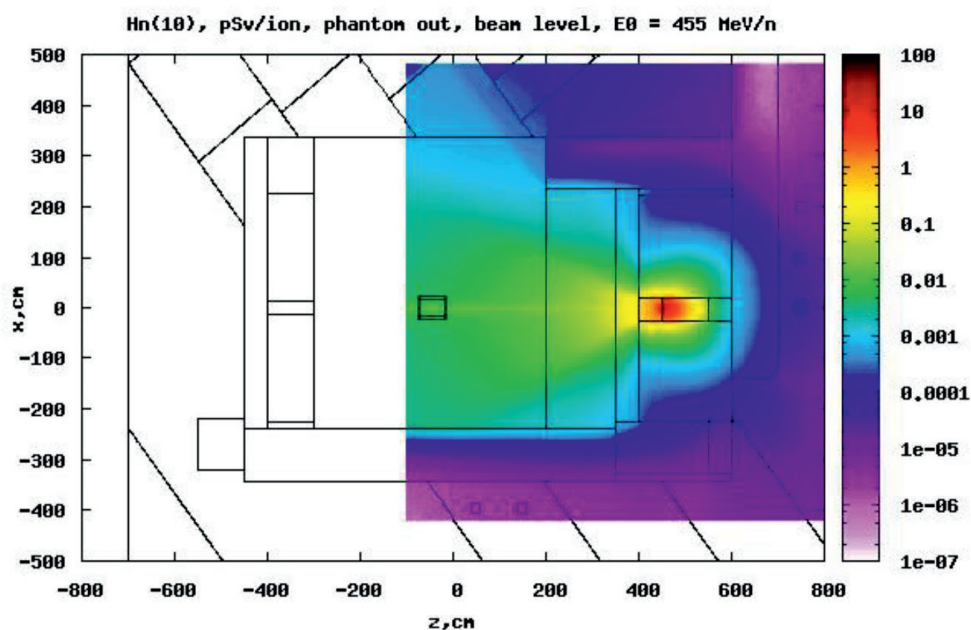


Рис. 2. Распределение амбиентного эквивалента дозы нейтронов $H_n(10)$ в зоне РБС при выводе пучка ионов на поглотитель. Расчет по FLUKA, $E_0 = 455$ МэВ/нуклон

Fig. 2. Distribution of the ambient dose equivalent of $H_n(10)$ neutrons in the RBS zone when the ion beam is extracted to the absorber. Calculation by FLUKA, $E_0 = 455$ MeV/nucleon

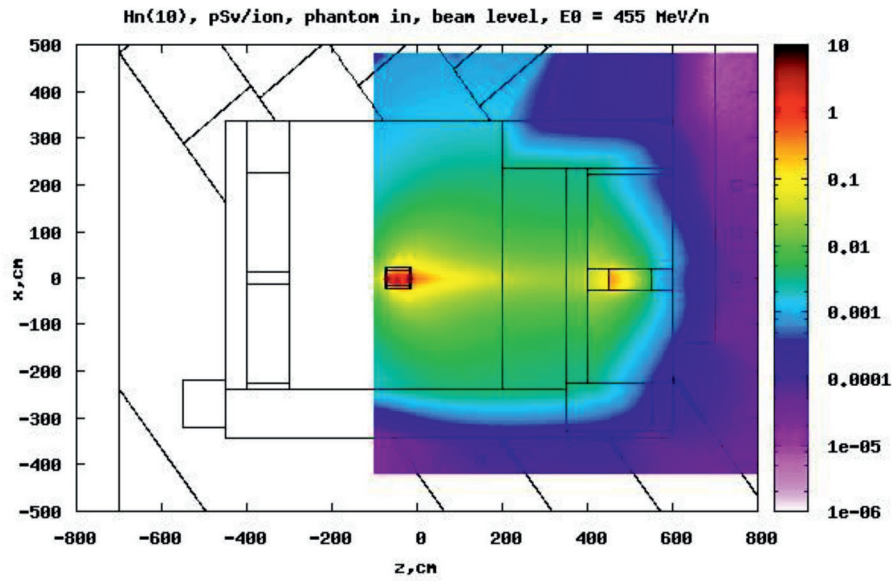


Рис. 3. Распределение амбиентного эквивалента дозы нейтронов $H_n(10)$ в зоне РБС при выводе пучка ионов на фантом, $E_0 = 455$ МэВ/нуклон. Расчет по FLUKA
 Fig. 3. Distribution of the ambient equivalent dose of neutrons $H_n(10)$ in the RBS zone when the ion beam is extracted to the phantom, $E_0 = 455$ MeV/nucleon. Calculation by FLUKA

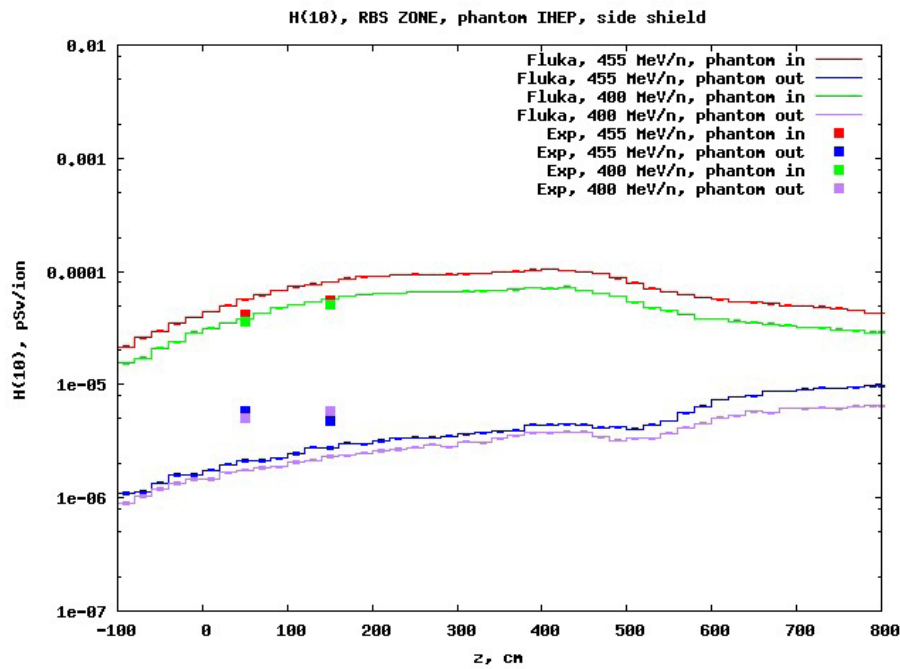


Рис. 4. Распределение амбиентного эквивалента дозы нейтронов $H_n(10)$ за боковой защитой зоны РБС на уровне пучка, на расстоянии 50 см от защиты
 Fig. 4. Distribution of the ambient neutron dose equivalent $H_n(10)$ behind the side protection of the RBS zone at the beam-line level, at a distance of 50 cm from the protection

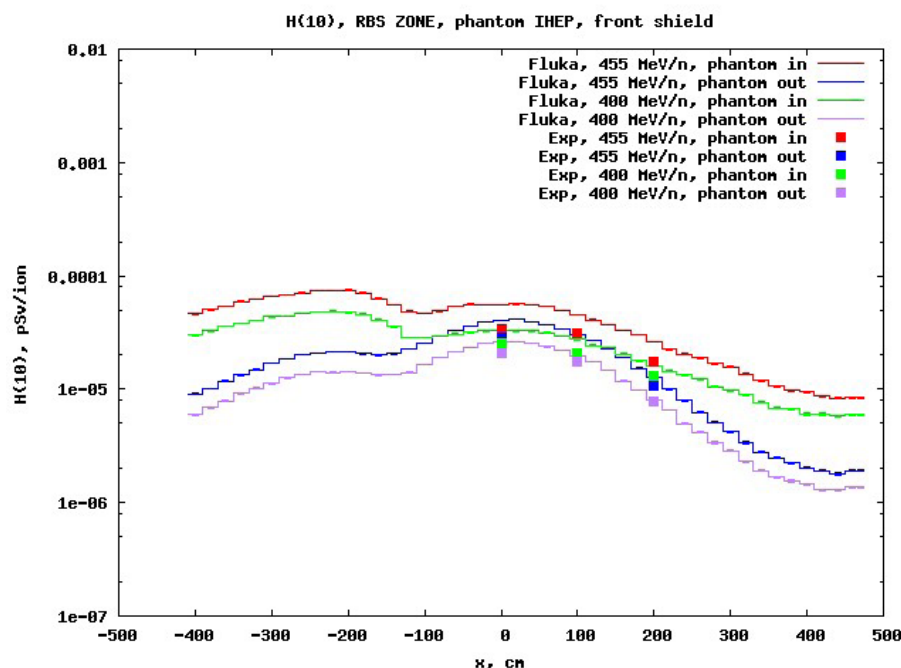


Рис. 5. Распределение амбиентного эквивалента дозы нейтронов $H_n(10)$ за передней защитой зоны РБС на уровне пучка, на расстоянии 50 см от защиты

Fig. 5. Distribution of the ambient neutron dose equivalent $H_n(10)$ behind the front protection of the RBS zone at the beam-line level, at a distance of 50 cm from the protection

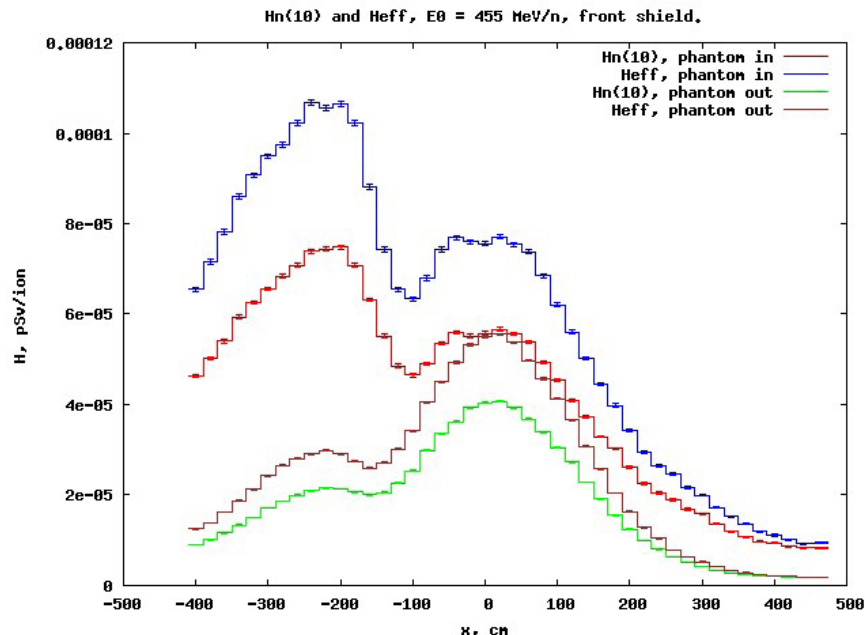


Рис. 6. Сравнение распределении амбиентного эквивалента дозы нейтронов $H_n(10)$ и эффективного эквивалента дозы H_{eff} за передней защитой зоны РБС на уровне пучка, на расстоянии 50 см, $E_0 = 455$ МэВ/нуклон

Fig. 6. Comparison of the distribution of the ambient neutron dose equivalent $H_n(10)$ and the effective dose equivalent H_{eff} behind the front protection of the RBS zone at the beam-line level, at a distance of 50 cm, $E_0 = 455$ MeV/nucleon

9. Замечания

1. Измеренные значения мощности амбиентного эквивалента дозы нейтронов не превышают установленного в ИФВЭ контрольного уровня – 22 мкЗв/час. При этом необходимо учитывать, что данный контрольный уровень установлен для существующего режима работы ускорителя У-70. При обосновании изменения работы установки РБС (время работы, интенсивность, энергия пучка и т. п.), необходимо произвести пересчет на установленные НРБ пределы годового облучения – 20 мЗв/год на рабочих местах персонала группы А и принятый в ИФВЭ 40 мЗв/год в местах временного пребывания персонала. Также необходимо учитывать, что данные пределы установлены для эффективного эквивалента дозы, значения которого за защитой зоны РБС до 1,5 раза превышают значения амбиентного эквивалента дозы нейтронов, и регламентированный при расчетах защиты коэффициент запаса – 2.

2. Расчетные значения амбиентного эквивалента дозы нейтронов превышают измеренные значения до 1,5 раза в большинстве измерений. Необходимо отметить, что использованный при измерениях нейтронный дозиметр ДКС-96 сертифицирован для проведения измерений при энергиях нейтронов до 10 МэВ и значительно занижает результаты при больших энергиях, как и большинство нейтронных дозиметров. Учитывая, что спектры нейтронов за защитой зоны РБС достаточно жесткие (вклад нейтронов с энергией выше 10 МэВ по дозе до 50 %), согласие между рассчитанными и измеренными значениями амбиентного эквивалента дозы нейтронов можно признать вполне удовлетворительным.

3. Обращает внимание значительное, до 2,5 раза, занижение расчетных значений по сравнению с измеренными за боковой защитой при выводе пучка ионов на поглотитель. Данное различие может быть объяснено не достаточно точным описанием геометрии расчета, в частности, полов зоны РБС вблизи точек измерения, а также погрешностью измерений при низких уровнях мощности амбиентного эквивалента дозы нейтронов ~ 1 мкЗв/час. Однако, учитывая, что мощность дозы в данном случае значительно ниже, чем при других режимах работы, и не имеет определяющего значения для оценки защиты и регламентированного при расчетах защиты коэффициента запаса – 2, результаты расчета и в этом случае можно признать достаточно достоверными.

Выводы

1. Результаты сравнения измеренных и рассчитанных значений амбиентного эквивалента дозы нейтронов позволяют сделать вывод, что результаты расчетов по программе FLUKA в условиях проведенных измерений вполне достоверны и данная программа может быть использована при проектировании биологической защиты пучков ионов углерода.

2. Существующая защита зоны РБС обеспечивает непревышение установленных в ИФВЭ контрольных уровней мощности дозы.

3. Исходя из проведенных расчетов, в настоящее время возможен вывод на мишень (фантом) в зоне РБС до $2,5 \times 10^{14}$ ионов углерода с энергией 455 МэВ/нуклон в год, без превышения установленных НРБ пределов годового облучения для персонала категории А.

Список литературы

1. **Ahdida C. et al.** New Capabilities of the FLUKA Multi-Purpose Code // *Frontiers in Physics*. 2022. Vol. 9. P. 788253.
2. **Battistoni G. et al.** Overview of the FLUKA code // *Annals of Nuclear Energy*. 2015. Vol. 82. P. 10–18.
3. **Pikalov V. A., Antipov Y. M., Maximov A. V. et al.** The results obtained on “Radiobiological stand” facility, working with the extracted carbon ion beam of the U-70 accelerator, CERN-Proceedings: 27, 27th Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC 2021, Alushta, 27 сентября –

- 1 октября 2021 г. Alushta, 2021. P. 124–126. DOI:10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB06. – EDN MLAFAQY.
4. Дозиметры-радиометры ДКС-96. Руководство по эксплуатации, ТЕ1.415313.003РЭ. ОКП 43 6250 НПО “ДОЗА” Версия_7_14.02.2012.
5. **Sumaneev O. V., Azhgirey I. L., Baishev I. S., Pikalov V. A.** Neutron field Measurements by GFPC based monitors at the Carbon beam at IHEP U-70 proton synchrotron // *Proceedings of 27th Russian Particle Acc. Conf. RuPAC2021, Alushta, Russia, 2021.* P. 129. DOI:10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRC01

References

1. **Ahdida C. et al.** New Capabilities of the FLUKA Multi-Purpose Code. *Frontiers in Physics*, 2022, vol. 9, pp. 788253.
2. **Battistoni G. et al.** Overview of the FLUKA code. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, vol. 82, pp. 10–18.
3. **Pikalov V. A., Antipov Y. M., Maximov A. V. et al.** The results obtained on “Radiobiological stand” facility, working with the extracted carbon ion beam of the U-70 accelerator, CERN-Proceedings: 27, 27th Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC 2021, Alushta, 27 сентября – 01 октября 2021 года. Alushta, 2021, pp. 124–126. DOI:10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB06. – EDN MLAFAQY.
4. Dosimeters-radiometers DKS-96 User manual SPC DOZA TE1.415313.003РЭ. ОКП 43 6250 Version_7_14.02.2012 (in Russ.)
5. **Sumaneev O. V., Azhgirey I. L., Baishev I. S., Pikalov V. A.** Neutron field Measurements by GFPC based monitors at the Carbon beam at IHEP U-70 proton synchrotron. In: *Proceedings of 27th Russian Particle Acc. Conf. RuPAC2021, Alushta, Russia, 2021,* p. 129. DOI:10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRC01

Сведения об авторах

Пикалов Владимир Александрович, начальник лаборатории

Суманеев Олег Валентинович, научный сотрудник

Сухарев Михаил Михайлович, ведущий инженер

Information about the Authors

Vladimir A. Pikalov, Head of laboratory

Oleg V. Sumaneev, Researcher

Mikhail M. Sukharev, Lead Engineer

*Статья поступила в редакцию 14.09.2023; одобрена после рецензирования 02.10.2023;
принята к публикации 25.04.2024*

*The article was submitted 14.09.2023; approved after reviewing 02.10.2023;
accepted for publication 25.04.2024*

Научная статья

УДК 537.563.2

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-48-56

Концепция ЭЦР источника с рабочей частотой 2,45 ГГц с перестраиваемым магнитным полем*

Максим Сергеевич Дмитриев¹, Максим Валентинович Дьяконов²
Марина Ивановна Жигайлова³, Олег Александрович Иванов⁴
Артем Сергеевич Краснов⁵, Сергей Алексеевич Туманов⁶

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Москва, Россия

¹MSDmitriyev@mephi.ru

²MVDyakonov@mephi.ru

³MIZhigailova@mephi.ru

⁴OAIvanov@mephi.ru

⁵ASKrasnov@mephi.ru

⁶SATumanov@mephi.ru

Аннотация

Произведена разработка ЭЦР ионного источника на частоту 2,45 ГГц, предназначенного для получения протонов и двухзарядных ионов гелия. Проиллюстрирован вид конструкции ионного источника и его основных узлов. Представлена конфигурация магнитной системы, способной работать как в ЭЦР-, так и в СВЧ-режиме. Разработана система экстракции и формирования пучка ионов с возможностью продольного перемещения системы электродов относительно плазменного электрода. Приведена конфигурация волноводного тракта ионного источника с рабочей частотой 2,45 ГГц, обеспечивающего стабильную подачу мощности в рабочую камеру, а также выполнены расчет и оптимизация его элементов.

Ключевые слова

ионный источник, электронно-циклотронный резонанс, магнитная система, система экстракции, плазменная камера, волноводный тракт

Для цитирования

Дмитриев М. С., Дьяконов М. В., Жигайлова М. И., Иванов О. А., Краснов А. С., Туманов С. А. Концепция ЭЦР источника с рабочей частотой 2,45 ГГц с перестраиваемым магнитным полем // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 3. С. 48–56. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-48-56

*Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

Overall Concept Design of 2.45 GHz ECR Ion Source
with Tunable Magnetic Field

Maksim S. Dmitriev¹, Maksim V. Dyakonov², Marina I. Zhigaylova³
Oleg A. Ivanov⁴, Artem S. Krasnov⁵, Sergey A. Tumanov⁶

National Research Nuclear University MEPhI
(Moscow Engineering Physics Institute)
Moscow, Russian Federation

¹MSDmitriyev@mephi.ru
²MVDyakonov@mephi.ru
³MIZhigailova@mephi.ru
⁴OAIvanov@mephi.ru
⁵ASKrasnov@mephi.ru
⁶SATumanov@mephi.ru

Abstract
The design of the ECR ion source was made for an operating frequency of 2.45 GHz. The ion source is considered to be used for producing protons and double charged helium ions. The source construction as well as the separate components design are presented in the study. The operating modes include both ECR and microwave operating regimes. The extraction system with the beamforming was developed. The beam adjustment is implemented by the longitudinal shifting of the electrodes against the plasma electrode position. The performance of the 2.45 GHz waveguide line to provide the stable power injection into the plasma chamber is considered. The numerical simulation of the waveguide line components was made and optimised.

Keywords
ion source, electron-cyclotron resonance, magnetic system, extraction system, plasma chamber, waveguide line

For citation
Dmitriev M. S., Dyakonov M. V., Zhigaylova M. I., Ivanov O. A., Krasnov A. S., Tumanov S. A. Overall concept design of 2.45 GHz ECR ion source with tunable magnetic field. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 3, pp. 48–56 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-48-56

Введение

В настоящее время НИЯУ МИФИ ведется разработка плазменного ЭЦР ионного источника, предназначенного для получения протонов и ионов двухзарядного гелия. Сделана попытка совместить преимущества микроволнового и ЭЦР источника в одном устройстве, способном работать в обоих режимах работы путем глубокой перестройки распределения магнитного поля.

Таблица 1
Основные характеристики 2,45 ГГц ЭЦР ионного источника
Table 1
The main properties of the 2.45GHz ECRIS

Тип ионов	p ⁺	He ²⁺
Энергия ионов, кэВ/нуклон	40	
Интенсивность, частиц в импульсе	до 2,5·10 ¹¹	до 2·10 ⁹
Длительность импульса, мс	20	
Давление в плазменной камере, Па	до 3·10 ⁻⁴	
СВЧ мощность, Вт	≤ 1000	
Рабочая частота, ГГц	2,45	

Разрабатываемый плазменный источник ионов предназначен для экспериментального обоснования возможности получения интенсивных пучков протонов и слаботочных пучков многозарядных ионов, в том числе гелия, в источнике с рабочей частотой 2,45 ГГц. Для реализации этих задач в одном источнике были применены следующие технические решения. Разработана магнитная система с глубокой перестройкой магнитного поля, позволяющая реализовать распределения поля как в ЭЦР-, так и в СВЧ-режиме, система СВЧ питания источника, длиннофокусная система экстракции ионов с электростатической линзой и возможностью подстройки параметров системы. В табл. 1 приведены основные характеристики плазменного ионного источника.

1. Разработка магнитной системы

Для генерации сильноточных пучков протонов или однозарядных ионов с током до 100 мА и небольшим эмиттансом, как правило, используются источники, работающие в СВЧ-режиме. Для получения ионов большей зарядности необходимо использовать источники на основе электронно-циклотронного резонанса. Магнитная система микроволновых источников и источников, работающих на электронно-циклотронном резонансе, имеют различные конфигурации. Последняя имеет дополнительные гексапольные или октапольные магниты, обеспечивающие формирование магнитной ловушки с ЭЦР-областью и конфигурацией «минимум В», что поддерживает возможность более глубокой обдирки ионов в процессе ступенчатой ионизации. Для ЭЦР источника с частотой 2,45 ГГц рассматривается возможность получения ионов с зарядностью, равной двум, с целью генерации двухзарядных ионов гелия. В продольном направлении плазма ограничена магнитными зеркалами на кольцевых постоянных магнитах или соленоидах, расположенных в областях окна ввода мощности и плазменного электрода, а в поперечном удерживается октапольными и гексапольными магнитами.

В рамках разработки ионного источника на частоте 2,45 ГГц, была построена математическая модель магнитной системы и произведено ее численное моделирование методом конечных элементов, после чего была осуществлена оптимизация распределения магнитного поля [1; 2].

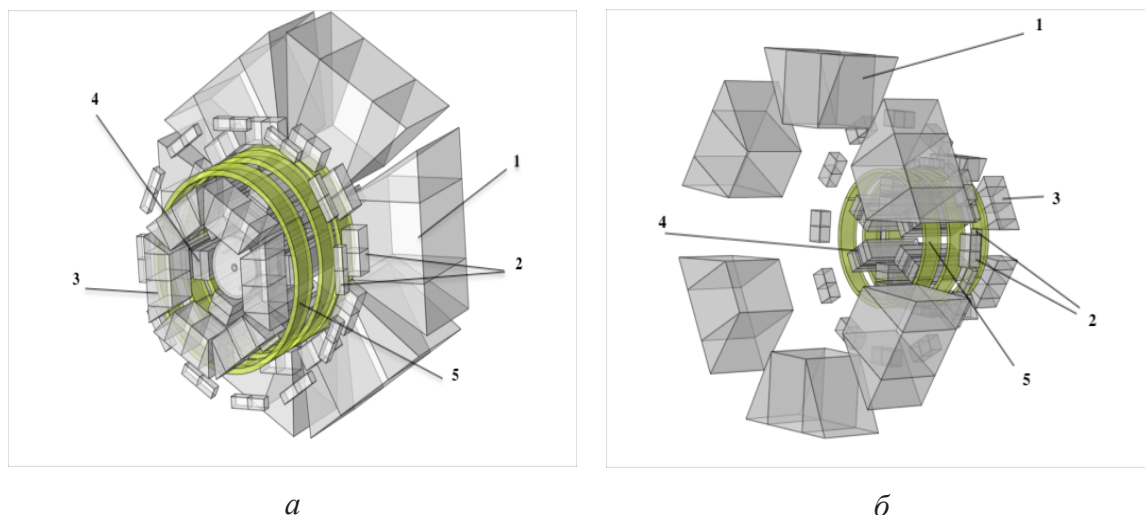


Рис. 1. Конфигурация магнитной системы, работающей в различных режимах:
а – электронно-циклотронного резонанса; б – микроволнового разряда.

1 – инжекционный кольцевой магнит; 2 – средний кольцевой магнит; 3 – кольцевой магнит области экстракции;
4 – гексаполь; 5 – соленоиды

Fig. 1. Magnetic system configuration operating in the different modes:
а – electron cyclotron resonance; б – microwave discharge

1 – injection ring magnet; 2 – medium ring magnet; 3 – ring magnet of the extraction area; 4 – hexapole; 5 – solenoids

Итоговая магнитная система состоит из трех комплектов магнитов. Гексаполюсный магнит состоит из двух сборок и обеспечивает регулировку радиального поля. Осевое поле создается двумя сборками трапецеидальных магнитов. Магниты сборок сдвинуты к оси камеры в ЭЦР-режиме работы источника (рис. 1, а) и отодвинуты от оси в СВЧ-режиме работы (рис. 1, б). В системе имеется несколько соленоидов, обеспечивающих дополнительную регулировку значений поля в области инжекции и экстракции. На рис. 2 приведено распределение магнитного поля вдоль продольной координаты для представленной системы магнитов в ЭЦР- и СВЧ-режимах работы [3]. При этом на рис. 2, а красными линиями обозначены границы плазменной камеры.

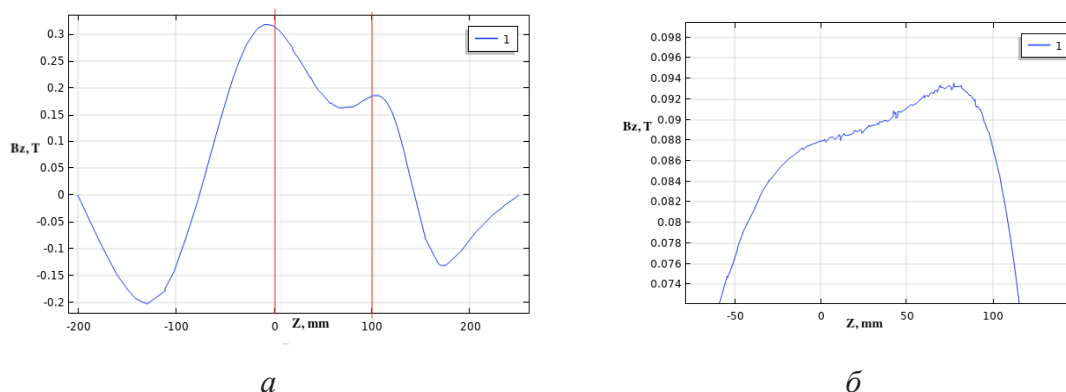


Рис. 2. Распределение магнитного поля вдоль продольной оси камеры в различных режимах:

а – электронно-циклотронного резонанса; б – микроволнового разряда

Fig. 2. Magnetic field distribution along the chamber longitudinal axis in the different modes:

а – electron cyclotron resonance; б – microwave discharge

Исходя из полученных результатов, рассчитанная конструкция магнитной системы может использоваться как в ЭЦР-режиме для получения двухзарядных ионов гелия, так и в СВЧ-режиме для получения протонов и однозарядных ионов гелия.

2. Оптимизация системы экстракции

Система экстракции построена на основе пирсовской системы электродов и электростатической линзы. Развита магнитная система плазменного СВЧ-источника ионов накладывает жесткие ограничения на конструкцию извлекающей системы. Для получения требуемых параметров пучка разработана конструкция с ускоряющей несимметричной электростатической линзой (рис. 3).

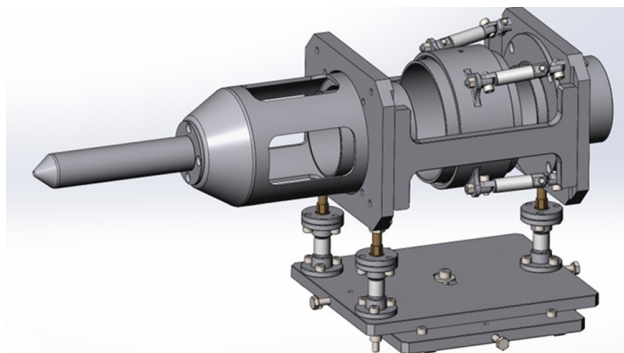


Рис. 3. Несимметричная электростатическая линза в сборе с извлекающим электродом

Fig. 3. An asymmetric electrostatic lens assembly with an extraction electrode

Для приведенной конфигурации системы экстракции эмиттанс пучка протонов на выходе из экстрактора составил $0,0036 \text{ мм} \cdot \text{рад}$, а диаметр пучка 7 мм на расстоянии 1 м от наконечника извлекающего электрода. На рис. 4 представлено поведение пучка протонов, извлекаемого экстрактором.

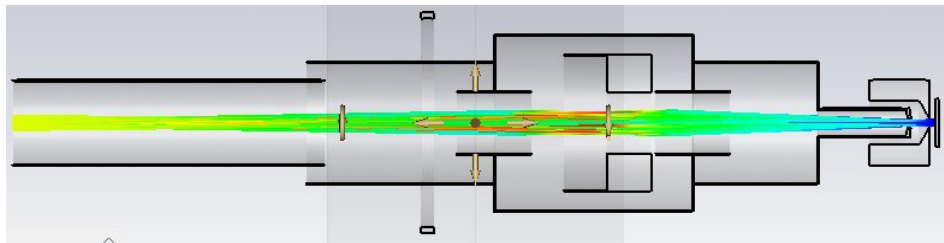


Рис. 4. Моделирование пучка протонов в экстракторе
Fig. 4. Simulation of a proton beam in an extractor

В системе существует возможность регулировки позиционирования извлекающего электрода относительно магнитной системы и плазменного электрода, а также возможность замены всех электродов.

3. Разработка системы СВЧ-питания

Одним из важнейших узлов плазменного ЭЦР источника ионов является система подачи СВЧ-мощности в плазменную камеру. На рис. 5 представлена схема системы подачи СВЧ-питания ЭЦР ионного источника [4]. Она представляет собой волноводный тракт с приведенным набором элементов. В качестве источника питания данной системы используется магнетрон. Представленная схема обеспечивает непрерывную подачу СВЧ-мощности в рабочую камеру, минимизацию отражения от плазменной нагрузки, а также возможность измерения уровня падающей и отраженной волны.

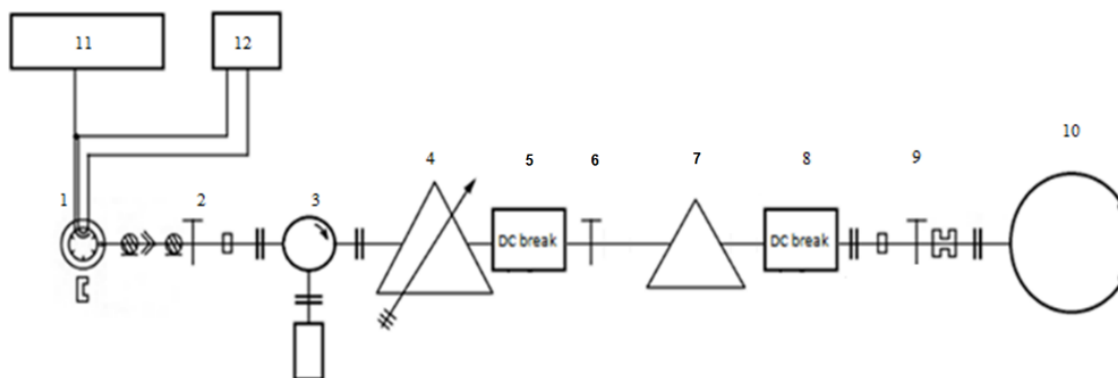


Рис. 5. Схема системы СВЧ-питания ЭЦР ионного источника:

1 – магнетрон; 2 – коаксиально-волноводный переход; 3 – циркулятор волноводный; 4 – трехшлейфовый штыревой согласователь с ручной регулировкой; 5 – высоковольтный DC-break; 6 – волноводный переход с WR 340 на WR 284; 7 – баночное окно ввода мощности; 8 – низковольтный DC-break; 9 – волноводный переход с прямоугольного волновода WR 284 на H-образный 43×12 ; 10 – рабочая камера, 11 – источник анодного питания магнетрона; 12 – трансформатор накала магнетрона

Fig. 5. The scheme of the ECRIS microwave power supply system:

1 – magnetron; 2 – coaxial waveguide adapter; 3 – waveguide circulator; 4 – triple-stub tuner with manual adjustment; 5 – high-voltage DC-break; 6 – waveguide transition from WR 340 to WR 284; 7 – power input window; 8 – low-voltage DC-break; 9 – waveguide transition from a rectangular waveguide WR 284 to an H-shaped 43×12 ; 10 – working chamber; 11 – magnetron anode power supply; 12 – magnetron filament transformer

Для обеспечения работы магнетрона в непрерывном режиме, а также стабильности частоты самого магнетрона была выполнена разработка блока питания магнетрона с регулируемым постоянным рабочим напряжением до 5 кВ.

Важно отметить, что плазма в источнике представляет собой нагрузку с переменным волновым сопротивлением, зависящим как от времени (при поджиге плазмы), так и от режима работы источника, что негативно скажется как на КПД передачи мощности в рабочую камеру, так и на стабильности выходной мощности и частоты колебаний магнетрона. Для решения данной проблемы в тракте используется трехшлейфовый штыревой согласователь, позволяющий согласовать волноводный тракт с плазменной нагрузкой с СВЧ-генератором [5–7].

Рабочая камера плазменного ЭЦР ионного источника расположена на высоковольтной платформе, потенциал которой составляет 80 кВ. При этом сам магнетрон и измерительную часть тракта необходимо расположить на заземленной части источника. Для разделения высоковольтной и низковольтной частей был разработан DC-break, позволяющий обеспечить не только разрыв по постоянному току, но также отсутствие излучения мощности в окружающее пространство и максимальное прохождение электромагнитной волны через DC-break. Вид разработанной конструкции DC-break приведен на рис. 6, а зависимость коэффициента отражения от частоты – на рис. 7.



Рис. 6. Вид DC-break
Fig. 6. DC-break view

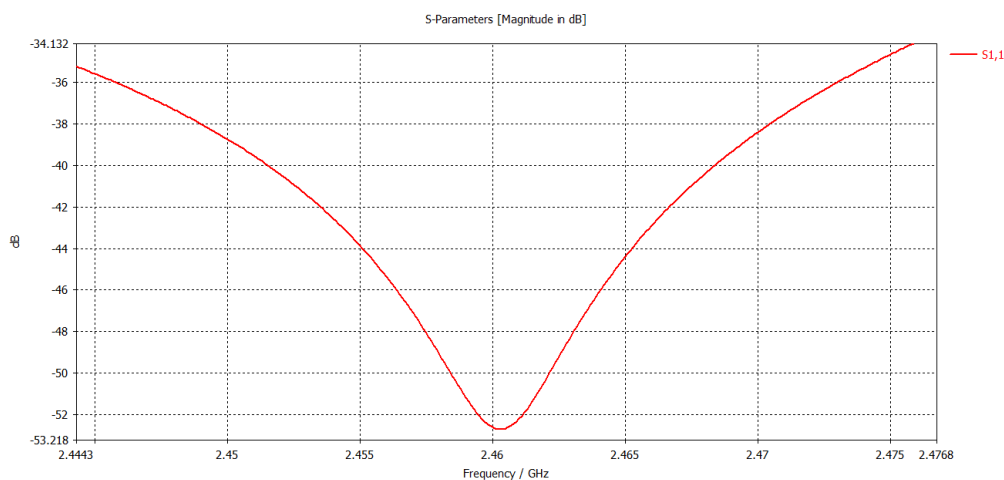


Рис. 7. Зависимость коэффициента отражения от частоты
Fig. 7. Dependence of the reflection coefficient on the frequency

Разработанная система СВЧ-питания плазменного ионного источника обеспечивает эффективную передачу мощности в плазменную камеру, а также стабильную работу магнетрона.

4. Конструкция плазменного ионного источника

Для получения требуемых параметров магнитного поля в плазменной камере необходимо обеспечить точное, синхронное перемещение магнитов. Разработана система перемещения магнитов на основе шаговых двигателей с удаленным управлением с помощью компьютера (рис. 8). При этом обеспечивается точность установки, необходимая при перестроении магнитного поля плазменного источника ионов.

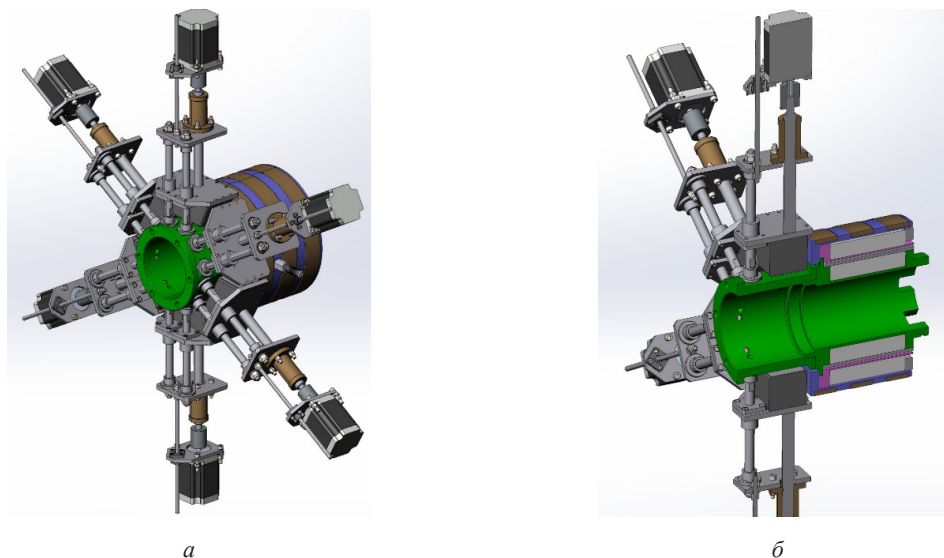


Рис. 8. Система перемещения магнитов:

a – общий вид системы перемещения магнитов; *б* – система перемещения магнитов в разрезе

Fig. 8. The magnet shifting system:

a – the general view of the magnet shifting system; *б* – the section view of magnet shifting system

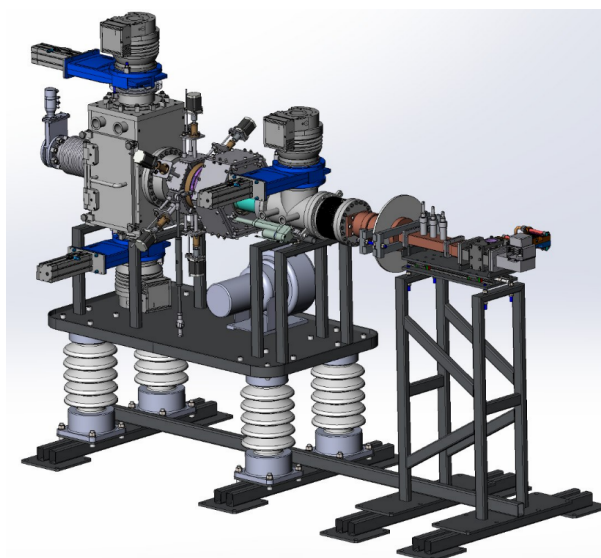


Рис. 9. Общий вид конструкции ЭЦР ионного источника

Fig. 9. General view of the ECRIS design

Разработана конструкция ЭЦР источника ионов, включающая высоковольтную платформу и другие инженерные системы (рис. 9).

Заключение

Разработан плазменный источник ионов, позволяющий получать протоны и однозарядные ионы при работе в СВЧ-режиме и имеющий возможность получения многозарядных ионов при работе в ЭЦР-режиме. Переключение режимов происходит за счет изменяемой конфигурации магнитной системы. Разработана система экстракции и формирования пучка ионов с возможностью продольного перемещения системы электродов относительно плазменного электрода. Приведена конфигурация волноводного тракта ионного источника с рабочей частотой 2,45 ГГц, с разработанными элементами, обеспечивающими стабильную передачу СВЧ-мощности в рабочую камеру.

Список литературы

1. **Dmitriyev M. S. et al.** Magnetic System with Variable Characteristics for a 2.45 GHz ECRIS // *Proc. of RuPAC'21*, 2021. P. 310–312. DOI: 10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUPSB38.
2. **Artamonov K. G. et al.** Magnetic System with Adjustable Characteristics for Electron Cyclotron Resonance Ion Source with Operating Frequency of 2.45 GHz // *Physics of Atomic Nuclei*. 2021. Vol. 84. P. 2010–2013. DOI: 10.1134/S1063778821100057.
3. **Muramatsu M. et al.** Development of an ECR ion source for carbon therapy // *Rev. Sci. Instrum.* 2002. Vol. 73, № 2. P. 573.
4. **Dmitriyev M. S., D'yakonov M. V., Tumanov S. A.** Waveguide Development for a 2.46 GHz Electron Cyclotron Resonance Ion Source // *Physics of Atomic Nuclei*. 2022. T. 85, № 11. C. 1899–1901.
5. **Kuang Y., Zhou L., Li S., Fan X., and Cheng Q. S.** In Proceedings of the 11th International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology ICMMT'2019, Guangzhou, China, May 2019. <https://doi.org/10.1109/ICMMT45702.2019.8992397>
6. **Grecu L.** Using short stubs for matching the impedance of a load to the impedance of a transmission line-analytical solution and computer code // *International Conference on Economic Engineering and Manufacturing Systems Brasov*. 2007. Vol. 8, no. 3 (21a). P. 492. URL: https://www.recentonline.ro/021/Grecu_L_02b-R21.pdf
7. **Bilik V. and Bezek J.** High power limits of waveguide stub tuners // *J. Microw. Power*. 2010. Vol. 44. P. 178–186.

References

1. **Dmitriyev M. S. et al.** Magnetic System with Variable Characteristics for a 2.45 GHz ECRIS. *Proc. of RuPAC'21*, 2021, pp. 310-312. DOI: 10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUPSB38.
2. **Artamonov K. G. et al.** Magnetic System with Adjustable Characteristics for Electron Cyclotron Resonance Ion Source with Operating Frequency of 2.45 GHz. *Physics of Atomic Nuclei*, 2021, vol. 84, pp. 2010–2013. DOI: 10.1134/S1063778821100057
3. **Muramatsu M. et al.** Development of an ECR ion source for carbon therapy. *Rev. Sci. Instrum.*, 2002, vol. 73, no. 2, p. 573.
4. **Dmitriyev M. S., D'yakonov M. V., Tumanov S. A.** Waveguide Development for a 2.46 GHz Electron Cyclotron Resonance Ion Source. *Physics of Atomic Nuclei.*, 2022, vol. 85, no. 11, pp. 1899–1901.
5. **Kuang Y., Zhou L., Li S., Fan X. and Cheng Q. S.** In Proceedings of the 11th International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology ICMMT'2019, Guangzhou, China, May 2019. <https://doi.org/10.1109/ICMMT45702.2019.8992397>

6. **Grecu L.** Using short stubs for matching the impedance of a load to the impedance of a transmission line-analytical solution and computer code. *International Conference on Economic Engineering and Manufacturing Systems Brasov*, 2007, vol. 8 no. 3 (21a), p. 492. URL: https://www.recentonline.ro/021/Grecu_L_02b-R21.pdf
7. **Bilik V. and Bezek J.** High power limits of waveguide stub tuners. *J. Microw. Power*, 2010, vol. 44, pp. 178–186.

Сведения об авторах

Дмитриев Максим Сергеевич, кандидат технических наук

Дьяконов Максим Валентинович, ведущий инженер

Жигайлова Марина Ивановна, аспирант, инженер

Иванов Олег Александрович, аспирант, инженер

Краснов Артем Сергеевич, аспирант, инженер

Туманов Сергей Алексеевич, аспирант, инженер

Information about the Authors

Maksim S. Dmitriev, Candidate of Technical Sciences

Maksim V. Dyakonov, Leading Engineer

Marina I. Zhigaylova, Postgraduate Student, Engineer

Oleg A. Ivanov, Postgraduate Student, Engineer

Artem S. Krasnov, Postgraduate Student, Engineer

Sergey A. Tumanov, Postgraduate Student, Engineer

*Статья поступила в редакцию 19.09.2023; одобрена после рецензирования 21.04.2024;
принята к публикации 21.06.2024*

*The article was submitted 19.09.2023; approved after reviewing 21.04.2024;
accepted for publication 21.06.2024*

Научная статья

УДК 621.384.665

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-57-63

Разработка магнитной системы на постоянных магнитах для энергосберегающего источника синхротронного излучения*

**Шамиль Бахадирович Лачынов^{1,2}, Николай Александрович Винокуров^{1,2}
Владимир Георгиевич Ческидов¹**

¹Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера
Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

proton7956@gmail.com

Аннотация

Для дальнейшего улучшения параметров источников синхротронного излучения можно использовать новые технологии. Одной из них является применение постоянных магнитов при создании элементов магнитной системы накопителя. Это поможет исключить влияние нестабильности электропитания и вибраций, вызванных работой системы охлаждения на стабильность положения электронного пучка. Кроме того, использование постоянных магнитов позволит увеличить апертуру вакуумной камеры и, таким образом, упростить вакуумную и инжекционную системы накопителя, а также увеличить пороговые токи неустойчивостей. Статья посвящена разработке двух поворотных магнитов, фокусирующего и дефокусирующего, из которых состоит регулярная часть магнитной системы энергосберегающего компактного источника синхротронного излучения. Представлены конструкция и результаты моделирования магнитного поля.

Ключевые слова

постоянные магниты, электронный накопитель, электронно-оптические системы, лазер на свободных электронах.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках программы № 075-15-2021-1359 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Для цитирования

Лачынов Ш. Б., Винокуров Н. А., Ческидов В. Г. Разработка магнитной системы на постоянных магнитах для энергосберегающего источника синхротронного излучения // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 3. С. 57–63. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-57-63

*Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

Development of a Permanent Magnet Magnetic System for an Energy-Saving Synchrotron Radiation Source

Shamil B. Lachynov^{1,2}, Nikolay A. Vinokurov^{1,2}
Vladimir G. Cheskidov¹

¹Institute of Nuclear Physics named after G. I. Budkera
Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk National Research State University
Novosibirsk, Russian Federation

proton7956@gmail.com

Abstract

New technologies can be used to further improve the parameters of synchrotron radiation sources. One of them is the use of permanent magnets when creating elements of the magnetic storage system. This will help eliminate the influence of power supply instability and vibrations caused by the operation of the cooling system on the stability of the electron beam position. In addition, the use of permanent magnets will make it possible to increase the aperture of the vacuum chamber and, thus, simplify the vacuum and injection systems of the storage device, as well as increase the threshold instability currents. This work is devoted to the development of two bending magnets, focusing and defocusing, which make up the regular part of the magnetic system of an energy-saving compact synchrotron radiation source. The design and results of magnetic field modeling are presented.

Keywords

permanent magnets, electron storage ring, electron-optical systems, free electron laser

Funding

The research was carried out under the program No. 075-15-2021-1359 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

For citation

Lachynov S. B., Vinokurov N. A., Cheskidov V. G. Development of a permanent magnet magnetic system for an energy-saving synchrotron radiation source. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 3, pp. 57–63 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-57-63

Введение

Источники рентгеновского излучения используются во многих областях науки и медицины. Для большинства пользователей требуется достаточная для их задач интенсивность излучения в заданном диапазоне длин волн на образце или входном окне экспериментальной станции. Кроме того, обычно требуется малая угловая расходимость излучения в каждой точке образца (равная поперечному размеру источника излучения, деленному на расстояние от источника до образца). Поэтому хороший источник излучения не только должен быть достаточно мощным, но и иметь малые поперечные размеры. В этом случае говорят, что источник имеет высокую яркость, которая определяется как мощность излучения, деленная на площадь (источника или коллимирующего отверстия) и на телесный угол, в котором идут лучи. Сейчас наиболее яркими лабораторными источниками рентгеновского излучения являются пучки электронов высокой энергии, проходящие через сильное поперечное магнитное поле и испускающие так называемое синхротронное излучение (СИ), а также лазеры на свободных электронах [1; 2]. Для создания таких источников может быть использован электронный пучок с малыми (менее 0,1 мм) поперечными размерами, циркулирующий в специальной установке – электронном накопителе.

С учетом того, что планируемые сейчас источники СИ будут работать через 10–20 лет, желательно существенно изменить (улучшить) их по сравнению с существующими. Одним из главных отличий нового источника излучения от существующих является отсутствие источников постоянного тока (и водяного охлаждения) у большинства элементов магнитной системы, использующих постоянные магниты. Разрабатываемые экспериментальные образцы

поворотных магнитов предназначены для проверки этого нового технического решения. Магнитные элементы такого типа можно применить для создания новых источников рентгеновского излучения и модернизации существующих электронных накопителей.

Магнитная система

Магнитовакуумная система накопителя с энергией 1,5 ГэВ состоит из двух длинных прямолинейных промежутков и двух полуколец. Регулярные части полуколец состоят из одинаковых пар магнитов – дефокусирующего, с углом поворота 9,5 градусов, полем 1 Тл и показателем спада 25, и фокусирующего, с углом поворота 2 градуса, полем $-0,4$ Тл и показателем спада 437,5.

Для достижения необходимых параметров магнитного поля оптимизировалась форма железных магнитопроводов. Оптимизированная форма магнитов показана на рис. 1 и 2.

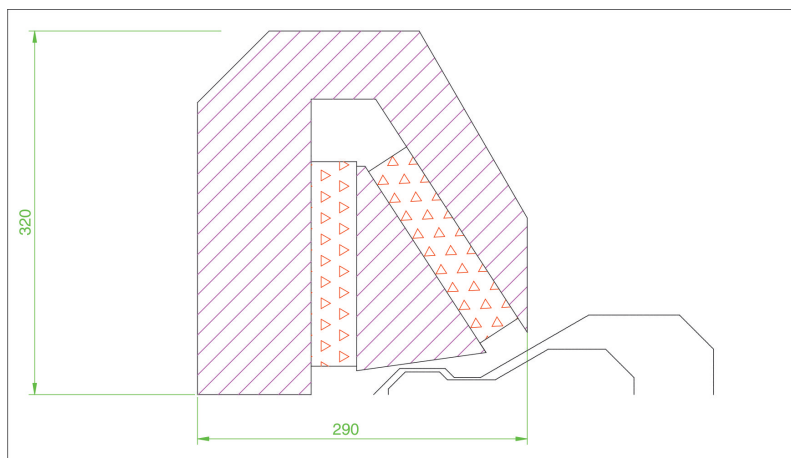


Рис. 1. Схема дефокусирующего магнита. Треугольная штриховка – постоянные магниты, косая – железный магнитопровод. Пунктиром показана алюминиевая вакуумная камера с вертикальным зазором 40 мм

Fig. 1. Schematic of the defocusing magnet. Triangular hatching marks permanent magnets, oblique one marks the iron yoke. Dotted lines show aluminum vacuum chamber with vertical gap of 40 mm

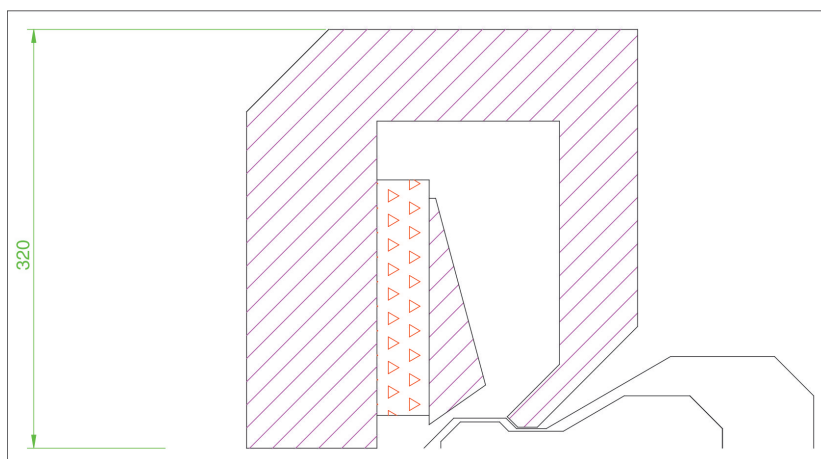


Рис. 2. Схема фокусирующего магнита. Треугольная штриховка – постоянные магниты, косая – железный магнитопровод. Пунктиром показана алюминиевая вакуумная камера с вертикальным зазором 40 мм

Fig. 2. Schematic of the focusing magnet. Triangular hatching marks permanent magnets, oblique one marks the iron yoke. Dotted lines show aluminum vacuum chamber with vertical gap of 40 mm

Результаты расчетов магнитного поля в оптимальных вариантах магнитов, показанных на рис. 1 и 2, приведены на рис. 3 и 4.

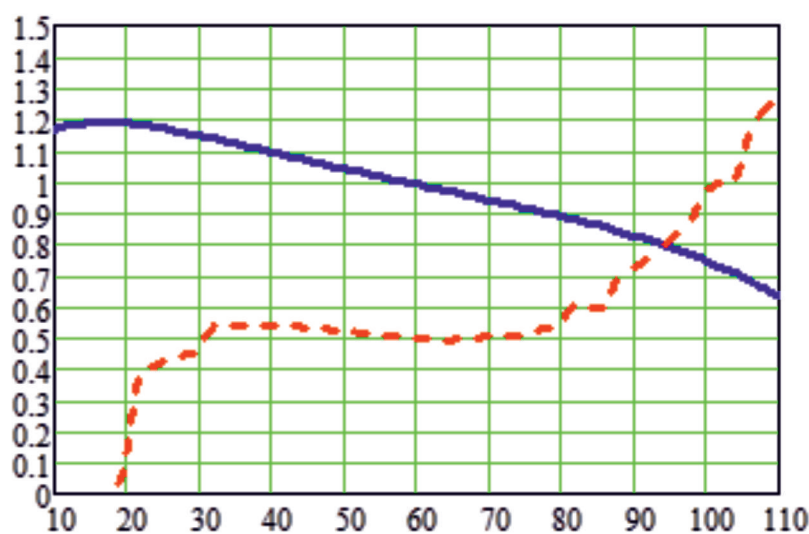


Рис. 3. Зависимость поля (Тл, сплошная линия) и фокусирующего «градиента», деленного на 10 и взятого с обратным знаком (Тл/м, пунктирная линия) дефокусирующего магнита от горизонтальной поперечной координаты (мм)

Fig. 3. Dependence of the field (T, solid line) and the focusing “gradient”, divided by 10 and taken with the opposite sign, (T/m, dotted line) of the defocusing magnet on the horizontal transverse coordinate (mm)

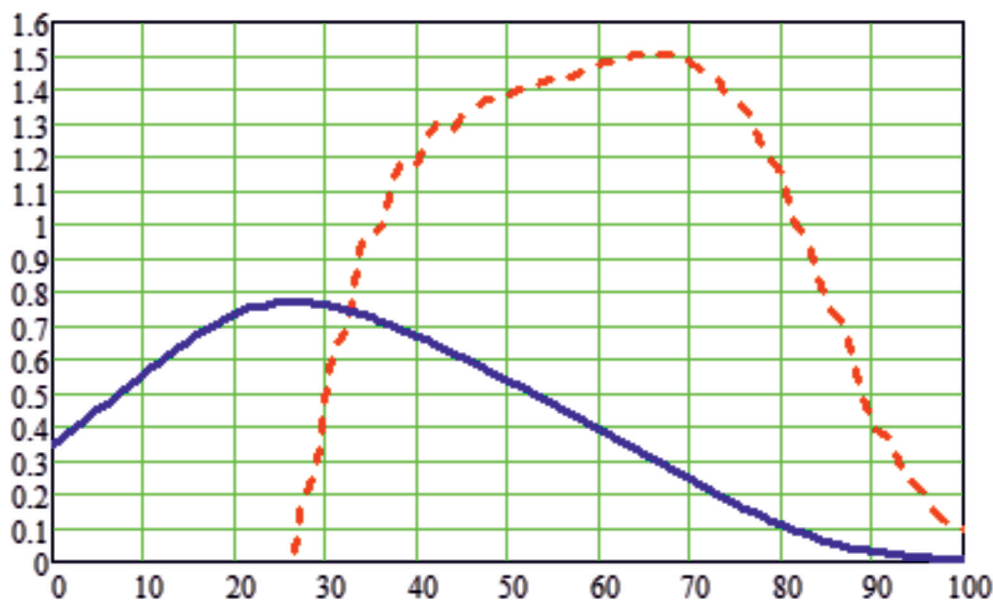


Рис. 4. Зависимость поля, взятого с обратным знаком (Тл, сплошная линия) и фокусирующего «градиента», деленного на 10 (Тл/м, пунктирная линия) фокусирующего магнита от горизонтальной поперечной координаты (мм)

Fig. 4. Dependence of the field taken with the opposite sign (T, solid line) and the focusing “gradient” divided by 10 (T/m, dotted line) of the focusing magnet on the horizontal transverse coordinate (mm)

Как показано на рис. 4, фокусирующий «градиент» $\partial B_y / \partial x$ в рабочей области (50–70 мм) растёт с ростом поперечной горизонтальной координаты x , причем $\partial^2 B_y / \partial x^2 \approx 50$ Тл/м². Такой секступоль служит для снижения абсолютной величины горизонтального хроматизма.

Эскизы механической конструкции поворотных магнитов

Общие виды поперечных сечений магнитов показаны на рис. 5 и 6.

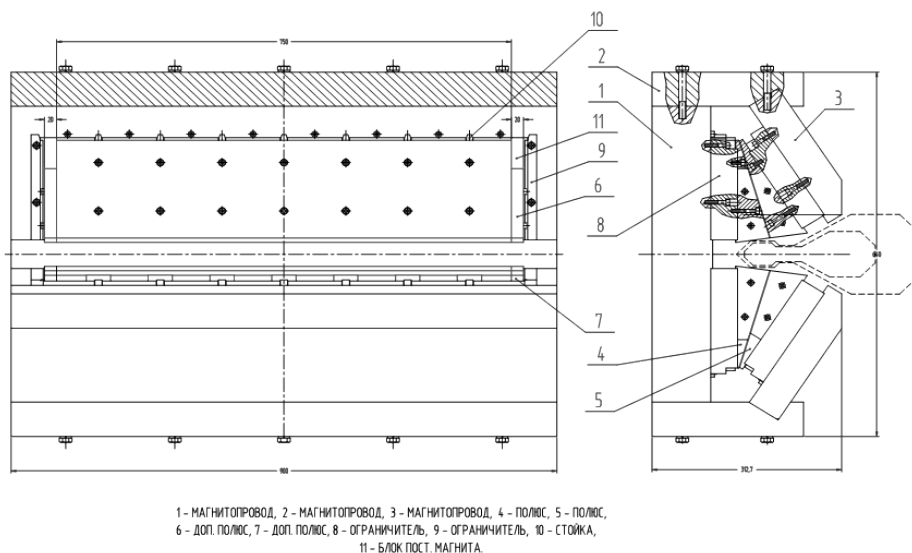


Рис. 5. Общий вид дефокусирующего магнита. Справа – поперечное сечение, на котором пунктиром показана алюминиевая вакуумная камера с вертикальным зазором 40 мм
Fig. 5. General view of the defocusing magnet. On the right is a cross-section, in which the aluminum vacuum chamber with a vertical gap of 40 mm is shown as a dotted line

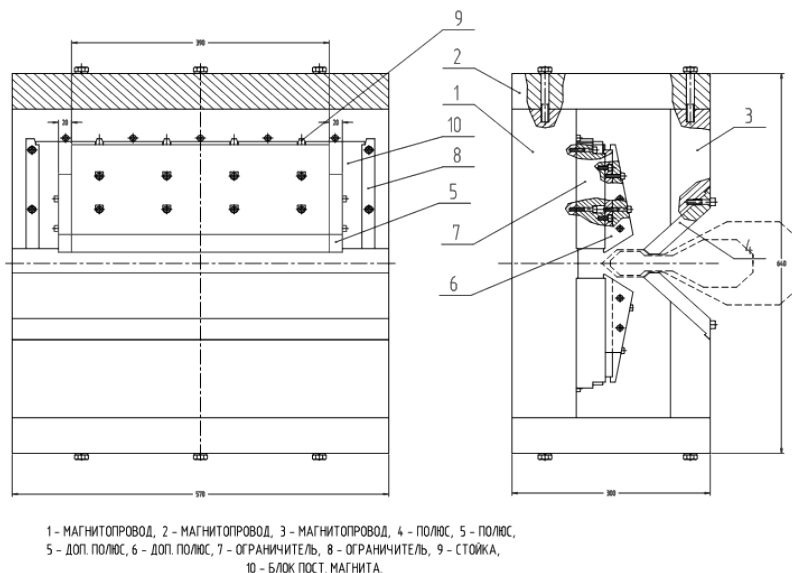


Рис. 6. Общий вид фокусирующего магнита. Справа – поперечное сечение, на котором пунктиром показана алюминиевая вакуумная камера с вертикальным зазором 40 мм
Fig. 6. General view of the focusing magnet. On the right is a cross-section, in which the aluminum vacuum chamber with a vertical gap of 40 mm is shown as a dotted line

Для получения магнитного поля используются плитки из материала неодим-железо-бор $90 \times 90 \times 40$ мм³. Каждая плитка магнитного материала притягивается к железному магнитопроводу с силой около 3 кН. Поэтому для облегчения сборки каждый железный полюс поворотных магнитов разделен на две части, правую и левую, как показано на рис. 5 и 6. При сборке часть полюса закрепляется на основном магнитопроводе, а затем плитка магнитного материала вставляется в зазор между двумя железными деталями – основным магнитопроводом и половиной полюса. В фокусирующем магните разделение полюсов позволяет скорректировать поле в рабочем зазоре без полной разборки магнита.

Кроме того, на входной и выходной частях полюсов имеются съемные железные накладки толщиной 20 мм (см. левые части рис. 5 и 6). Их замена на накладки другой толщины позволяет скорректировать магнитную длину по результатам измерения магнитного поля.

Основные параметры поворотных магнитов

Дефокусирующий магнит поворачивает электроны с энергией 1,5 ГэВ на угол $9,5^\circ$, а фокусирующий – на угол -2° . Таким образом, каждое полукольцо накопителя представляет собой последовательность поворотов на $7,5^\circ$ с фокусирующей системой ФОДО и средним радиусом 26,55 м. Основные параметры поворотных магнитов представлены в таблице.

Основные параметры поворотных магнитов

Basic parameters of bending magnets

Магнит	Фокусирующий	Дефокусирующий
Угол поворота при энергии электронов 1,5 ГэВ, град	-2	9,5
Магнитное поле, Тл	-0,4	1
Фокусирующий градиент, Тл/м	13,7	-5,0
Магнитная длина, м	0,436	0,829
Вертикальная апертура, мм	50	46
Длина, м	0,57	0,9
Ширина, м	0,3	0,313
Высота, м	0,64	0,64
Масса, кг	600	1000

После изготовления в экспериментальном производстве ИЯФ СО РАН детали экспериментальных образцов поворотных магнитов будут доставлены в лабораторию для сборки. После сборки будут проведены измерения магнитного поля и сравнение результатов измерений с расчетными значениями.

Заключение

Энергосберегающие недорогие и простые в обращении источники рентгеновского излучения могут быть построены при больших университетах и использоваться для мультидисциплинарных исследований и обучения студентов и аспирантов. Наличие таких источников качественно изменит уровень научно-технологических разработок в больших университетах, так как последние не только получают постоянный доступ к излучению, но и смогут модернизировать свои источники в соответствии с потребностями конкретных экспериментов с использованием рентгеновского излучения.

Список литературы

1. **Винокуров Н. А., Левичев Е. Б.** Ондюляторы и вигглеры для генерации излучения и других применений // УФН. 2015. Т. 185, № 9. С. 917–939.
2. **Винокуров Н. А., Шевченко О. А.** Лазеры на свободных электронах и их разработка в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН // УФН. 2018. Т. 188, № 5. С. 493–507.

References

1. **Vinokurov N. A., Levichev E. B.** Undulators and wigglers for production of radiation and other applications. *Phys. Uspekhi*, 2015, vol. 58 (9), pp. 850–871. (in Russ.)
2. **Vinokurov N. A., Shevchenko O. A.** Free electron lasers and their development at the Budker Institute of Nuclear Physics, SB RAS. *Phys. Uspekhi*, 2018, vol. 61, pp. 435–448. (in Russ.)

Сведения об авторах

Лачынов Шамиль Бахадирович, аспирант, инженер-исследователь

Винокуров Николай Александрович, профессор, заведующий лабораторией

Ческидов Владимир Георгиевич, старший научный сотрудник

Information about the Authors

Shamil B. Lachynov, Postgraduate student, Researcher-Engineer, Assistant Lecturer

Nikolay A. Vinokurov, Professor, Head of the Laboratory

Vladimir G. Tscheskidov, Senior Researcher

*Статья поступила в редакцию 12.09.2023; одобрена после рецензирования 20.09.2023;
принята к публикации 25.04.2024*

*The article was submitted 11.09.2023; approved after reviewing 20.09.2023;
accepted for publication 25.04.2024*

Научная статья

УДК 621.3.038.615

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-64-71

Магнитный группирователь с поворотом на 540 градусов*

Шамиль Бахадирович Лачынов^{1,2}, Николай Александрович Винокуров^{1,2}
Владимир Георгиевич Ческидов¹

¹Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера,
Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет,
Новосибирск, Россия
proton7956@gmail.com

Аннотация

Получение коротких электронных пучков с высоким значением пикового тока необходимо для разных исследовательских и технологических применений. Такая процедура требует наличия особой магнитной группирующей системы. Настоящая статья представляет собой общий обзор разработки нового магнитного группирователя. Обзор состоит из описания схемы группирователя, результатов моделирования магнитного поля и расчета опорной траектории релятивистских электронов, а также конструкции поворотных магнитов. Группирователь обеспечивает сильную зависимость времени пролета от энергии частицы и, таким образом, способен группировать относительно длинные пучки в короткие. Другой его особенностью является то, что все электронно-оптические элементы данного устройства сделаны на постоянных магнитах.

Ключевые слова

короткие электронные пучки, электронно-оптические системы, фокусирующие магниты, постоянные магниты

Финансирование

This work was supported by grant 21-12-00207 of the Russian Science Foundation..

Для цитирования

Лачынов Ш. Б., Винокуров Н. А., Ческидов В. Г. Магнитный группирователь с поворотом на 540 градусов // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 3. С. 64–71. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-64-71

*Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

The 540° Magnetic Buncher

Shamil B. Lachynov^{1,2}, Nikolay A. Vinokurov^{1,2}
Vladimir G. Cheskidov¹

¹Institute of Nuclear Physics named after G. I. Budkera,
Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk National Research State University,
Novosibirsk, Russian Federation
proton7956@gmail.com

Abstract

Generation of short electron bunches with high peak current is of great importance for different research and technological applications. Such generation requires a special bunching magnetic system. The paper is an overview of the development of a new magnetic buncher. It consists of the buncher scheme description, the results of magnetic field modeling and reference particle trajectory calculation for the relativistic electrons, and of the description of bending magnets. The buncher provides a strong dependence of the time of flight on the particle energy and thus is capable to bunch relatively long bunches to short ones. Another feature of the buncher is that all electron-optical elements has been made of permanent magnets.

Keywords

Short electron bunches, electron-optical systems, focusing magnets, permanent magnets

Funding

This work was supported by grant 21-12-00207 of the Russian Science Foundation.

For citation

Lachynov S. B., Vinokurov N. A., Cheskidov V. G. The 540° Magnetic Buncher. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 3, pp. 64–71 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-64-71

Введение

Для многих технологических и исследовательских целей требуется получение коротких (пикосекундных) электронных сгустков с большим (более 10 нКл) зарядом, т. е. пиковым током более 1 кА. При этом нормализованный эмиттанс электронного пучка должен быть невелик (менее 100 мм · мрад). Такие сгустки можно получать группировкой (продольным сжатием) электронных сгустков с меньшим пиковым током. Для преодоления кулоновского расталкивания группировку следует проводить при релятивистских энергиях электронов в специальной магнитной системе с сильной зависимостью времени пролета от энергии частиц – так называемом магнитном группирователе. Несколько лет назад в ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН была предложена оригинальная схема эффективного магнитного группирователя с поворотом на 540 градусов [1; 2], но дальнейших работ в этом направлении не проводилось.

Схема проектируемого группирователя изображена на рис. 1. Группирующее устройство состоит из двух тридцатиградусных магнитов с параллельными краями и двух магнитных зеркал. Проходя последовательно через первый магнит с параллельными краями, большое магнитное зеркало, малое магнитное зеркало, снова большое магнитное зеркало и второй магнит с параллельными краями, электроны совершают поворот на $30 + 120 + 240 + 120 + 30 = 540^\circ$. Радиусы траектории в поворотных магнитах и расстояния между магнитами подобраны таким образом, что поворот является ахроматическим. Это значит, что горизонтальный угол и координата электрона, выходящего из последнего поворотного магнита, не зависят (в линейном приближении) от отклонения энергии этого электрона от расчетной энергии (т. е. энергии опорной частицы). Расчет траектории, продольной дисперсии и поперечной фокусировки частиц описан в статье [3]. Группирователь предполагается установить в канал инжекции электронов с кинетической энергией около 1,5 МэВ на установке «Новосибирский лазер на свободных электронах» [4]. Тридцатиградусные магниты уже существуют, поэтому в данной работе представлены только конструкция и результаты расчета поля магнитных зеркал.

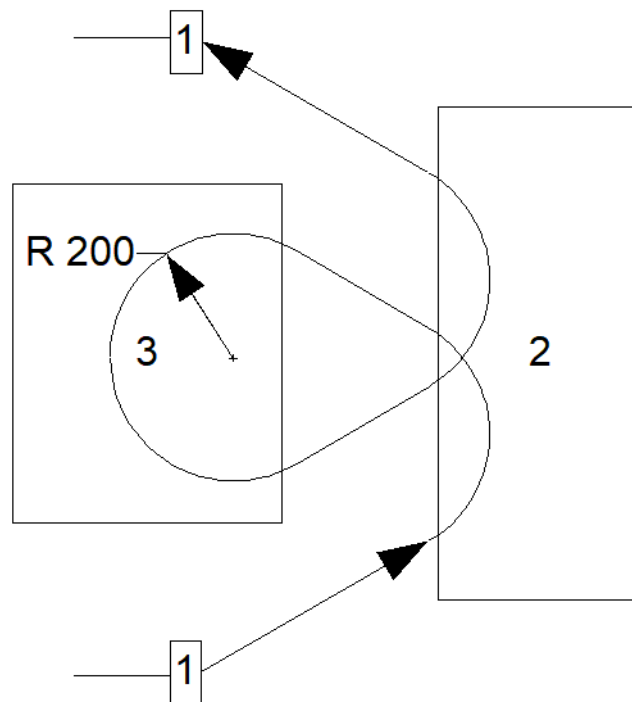


Рис. 1. Схема группирующей магнитной системы с поворотом на 540 градусов:
1 – тридцатиградусные магниты; 2 – большое магнитное зеркало; 3 – малое магнитное зеркало.
Опорная траектория электронов показана сплошной кривой

Fig. 1. Scheme of 540° buncher:

1 – 30° bending magnets; 2 – large magnetic mirror; 3 – small magnetic mirror

Расчет и оптимизация магнитной системы

Для получения высокой стабильности магнитного поля и удешевления системы в конструкции магнитных зеркал использованы постоянные магниты из сплава неодим-железо-бор, имеющие остаточную индукцию B_r около 13 кГс и энергетическое произведение $(BH)_{\max}$ около 40 МГс·Э. При таких параметрах магнитов для минимизации их количества (полного объема магнитного материала) надо получить индукцию в магнитах около 7 кГс. При этом необходимое поле в рабочем зазоре магнитов гораздо меньше (около 300 Гс). Поэтому для получения достаточно большой индукции в постоянных магнитах железный магнитопровод должен обеспечить концентрацию магнитного потока, проходящего через рабочий зазор, в объеме, занятом постоянными магнитами. При разработке геометрии магнитопроводов были выбраны стандартные плитки магнитного материала с размерами $40 \times 40 \times 20$ мм³ с намагниченностью вдоль коротких ребер. Большое и малое магнитные зеркала различаются только некоторыми размерами и величиной поля в рабочем зазоре.

Схема магнитного зеркала показана на рис. 2. Для приближенного расчета поля в рабочем зазоре и минимизации объема магнитного материала был использован аналитический расчет [5]:

$$B = \frac{B_r S}{2\pi CG},$$

где S – суммарная площадь плиток магнитного материала в верхней половине магнита и предполагается, что высота этих плиток равна высоте g зазора между железными полюсом и экра-

ном, находящимся под нулевым потенциалом, C – эквивалентная емкость одного (например, верхнего) полюса. Для расчетов магнитного поля обычно используют не эквивалентную емкость C , а магнитную проводимость $4\pi C$. Последняя равна отношению магнитного потока, вытекающего из полюса в отсутствие постоянных магнитов при заданном скалярном магнитном потенциале, к величине потенциала. Эта величина зависит от формы магнитопроводов и довольно легко оценивается. Следующий этап работы состоял в расчете поля при помощи CST-Studio, программного пакета, реализующего функции системы автоматизированного проектирования и электромагнитного моделирования. При этом оптимизировались размеры элементов магнитопровода для получения нужного поля в рабочих зазорах обоих магнитных зеркал при использовании минимального объема магнитного материала.

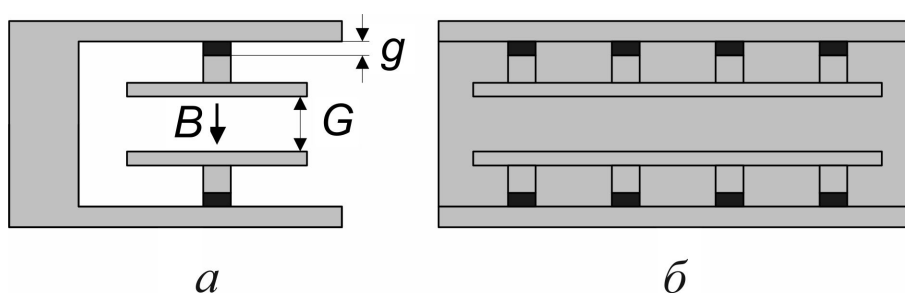


Рис. 2. Схема магнитного зеркала:

a – вид сбоку, b – вид спереди. Черным цветом показаны плитки магнитного материала, серым – железные магнитопроводы, а стрелкой – направление вектора поля в рабочем зазоре

Fig. 2. Scheme of a magnetic mirror: (a) side view and (b) front view. Tiles of the magnetic material are in black, the iron magnetic cores are in gray, and the arrow shows the direction of the field vector in the working gap.

Кроме того, оптимизировалось расположение плиток постоянных магнитов для получения необходимой однородности поля в рабочем зазоре. Один из результатов расчетов показан на рис. 3. При рабочем зазоре $G = 84$ мм характерные значения B поля в медианной плоскости составляют примерно 330 и 220 Гс для малого и большого магнитных зеркал соответственно. Зависимость поля от расстояния до края магнита будет использована для уточнения формы траектории, показанной на рис. 1.

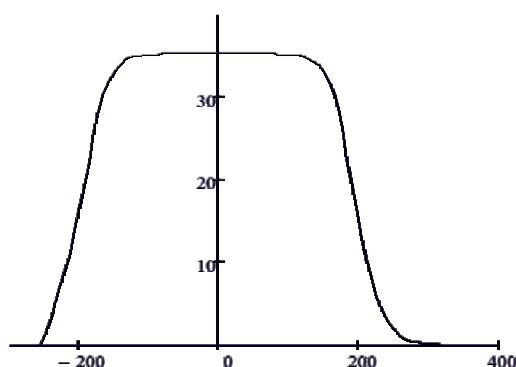


Рис. 3. Рассчитанная зависимость индукции (мТл) в медианной плоскости малого магнитного зеркала от координаты (мм), поперек края магнита

Fig. 3. Calculated dependence of the induction (mT) in the median plane of a large magnetic mirror on the coordinate (mm) across the edge of the magnet

После оптимизации параметров магнитных зеркал был разработан технический проект и полные комплекты чертежей магнитных зеркал (рис. 4, 5) и вакуумной камеры (рис. 6) группирователя и начато изготовление магнитных зеркал и вакуумной камеры в экспериментальном производстве Института ядерной физики СО РАН.

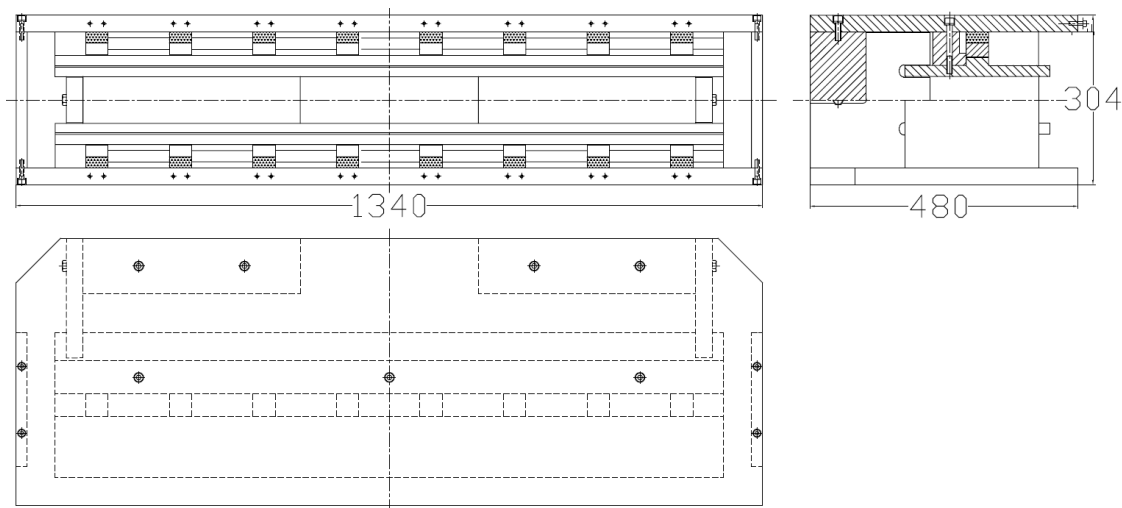


Рис. 4. Общий вид большого магнитного зеркала
Fig. 4. The general view of large the magnetic mirror

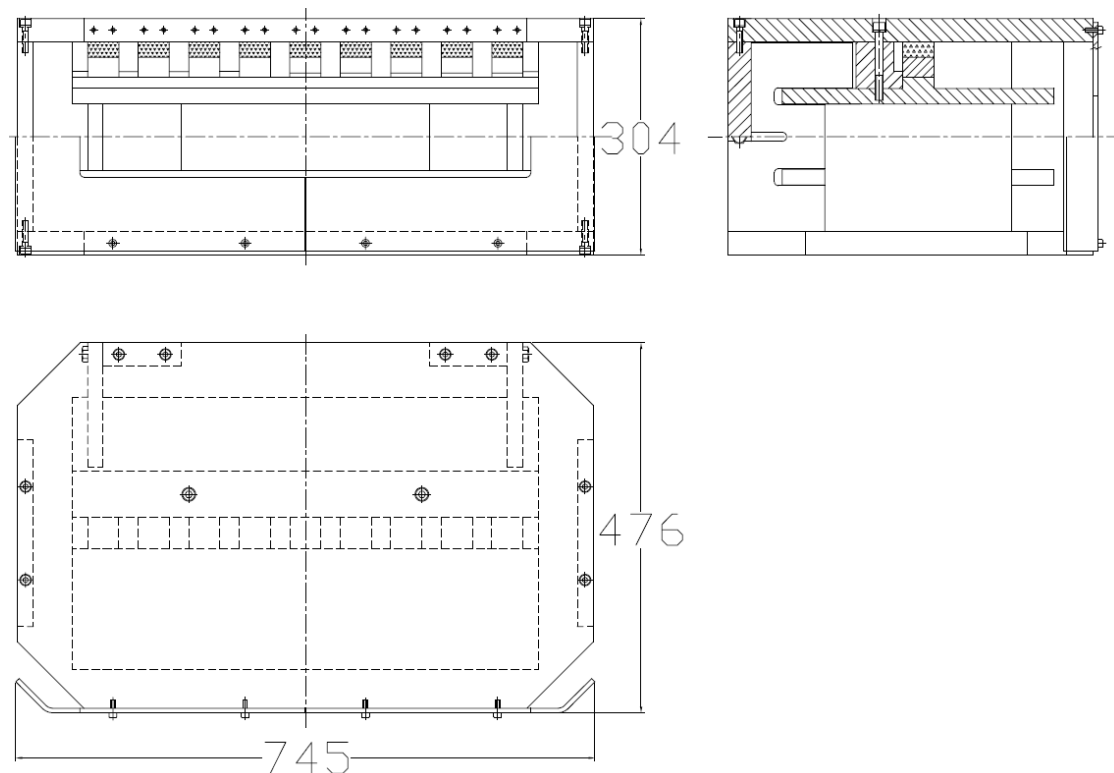


Рис. 5. Общий вид малого магнитного зеркала
Fig. 5. The general view of small the magnetic mirror

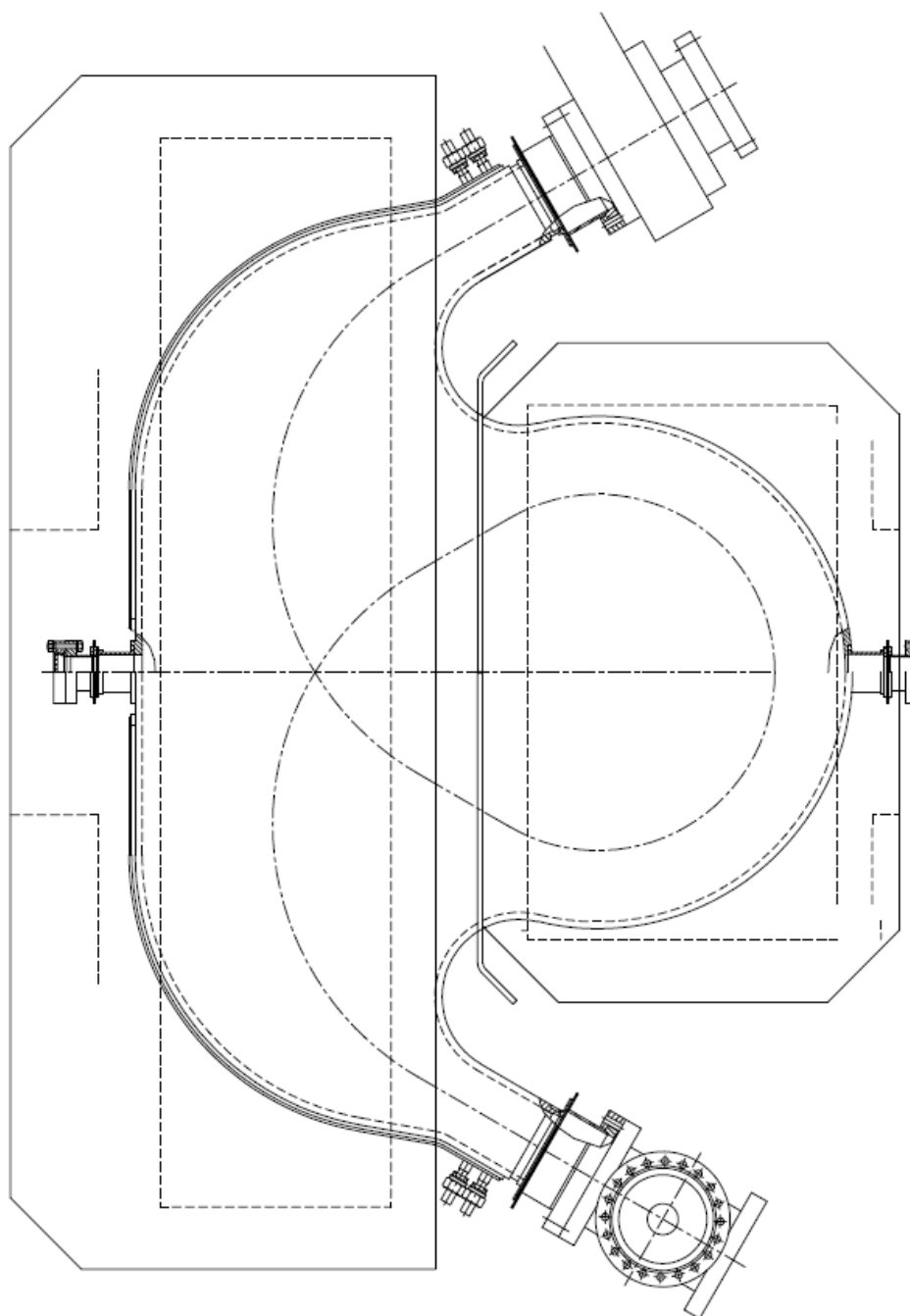


Рис. 6. Общий вид вакуумной камеры. Показаны положения магнитных зеркал (большое – шестиугольник слева, малое – восьмиугольник справа) и расчетная траектория (штрихпунктирная петля)

Fig. 6. The general view of the vacuum chamber. The magnetic mirrors positioning (large magnetic mirror – the hexagon from the left, the small magnetic mirror – the octagon from the right) and the particle reference trajectory (the dotted line) are depicted

Применение постоянных магнитов позволило существенно удешевить магнитные зеркала, так как отпала необходимость использования дорогостоящих источников постоянного тока

с высокой стабильностью и изготовления медных обмоток. Кроме того, вес магнитных зеркал на постоянных магнитах значительно меньше, чем для электромагнитного варианта.

Заключение

В настоящей статье был приведен обзор результатов проектирования магнитного группирователя для установки «Новосибирский лазер на свободных электронах». Дальнейшая работа будет направлена на проведение измерения фактических значений магнитного поля при введении группирующей системы в эксплуатацию, а также на изучение влияния пространственного заряда на длину электронного сгустка.

Список литературы

1. **Skrinsky A.** Electron cooling and electron nuclei colliders, in Proc. APS / DPF / DPB Summer Study on the Future of Particle Physics (Snowmass 2001), Snowmass, Colorado, June 2001, paper T903, eConf C010630 (2001) T903
2. **Vinokurov N. A., Parkhomchuk V. V., Skrinsky A. N.** RF Accelerator for Electron Cooling of Ultrarelativistic Hadrons, in proceedings of 12th Workshop on Beam Cooling, 2019. P. 26. URL: <https://accelconf.web.cern.ch/cool2019/papers/tuy01.pdf>
3. **Lachynov S. B., Vinokurov N. A.** Developing of 540° magnetic buncher // JINST. 2023. Vol. 18. P. 06011.
4. **Винокуров Н. А., Шевченко О. А.** Лазеры на свободных электронах и их разработка в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН // УФН. 2018. Т. 188, № 5. С. 493.
5. **Lachynov S. B., Vinokurov N. A., Getmanov Y. V.** Development of a 540° Magnetic Buncher Based on Permanent Magnets // Phys. Part. Nuclei Lett. 2023. Vol. 20. P. 822–824

References

1. **Skrinsky A.** Electron cooling and electron nuclei colliders, in Proc. APS / DPF / DPB Summer Study on the Future of Particle Physics (Snowmass 2001), Snowmass, Colorado, June 2001, paper T903, eConf C010630 (2001) T903
2. **Vinokurov N. A., Parkhomchuk V. V., Skrinsky A. N.** RF Accelerator for Electron Cooling of Ultrarelativistic Hadrons, in proceedings of 12th Workshop on Beam Cooling, 2019. P. 26. URL: <https://accelconf.web.cern.ch/cool2019/papers/tuy01.pdf>
3. **Lachynov S. B., Vinokurov N. A.** Developing of 540° magnetic buncher. JINST, 2023, vol. 18, p. 06011.
4. **Vinokurov N. A., Shevchenko O. A.** Free electron lasers and their development at the Budker Institute of Nuclear Physics, *SB RAS, Phys. Usp.*, 2018, vol. 61, pp. 435–448.
5. **Lachynov S. B., Vinokurov N. A., Getmanov Y. V.** Development of a 540° Magnetic Buncher Based on Permanent Magnets. *Phys. Part. Nuclei Lett.*, 2023, vol. 20, pp. 822–824.

Сведения об авторах

Лачынов Шамиль Бахадирович, аспирант, инженер-исследователь, ассистент

Винокуров Николай Александрович, профессор, заведующий лабораторией

Ческидов Владимир Георгиевич, старший научный сотрудник

Information about the Authors

Shamil B. Lachynov, Postgraduate Student, Researcher-Engineer, Assistant Lecturer

Nikolay A. Vinokurov, Head of the Laboratory

Vladimir G. Tscheskidov, Senior Researcher

*Статья поступила в редакцию 13.09.2023; одобрена после рецензирования 02.10.2023;
принята к публикации 25.04.2024*

*The article was submitted 13.09.2023; approved after reviewing 02.10.2023;
accepted for publication 25.04.2024*

Научная статья

УДК 537.626

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-72-80

Квадруполь на постоянных магнитах для финального фокуса*

Евгений Игоревич Антохин¹, Владимир Сергеевич Елисеев
Виталий Викторович Зуев, Адил Ислам оглы Микайылов
Мария Дмитриевна Буцыкина, Алексей Юрьевич Пахомов
Константин Владимирович Жилиев, Владимир Александрович Востриков
Тания Равильевна Дербышева

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

¹antokhin@inp.nsk.su

Аннотация

Представлена общая теория постоянных мультипольных магнитов и описана конструкция квадрупольного магнита типа Halbach-2 в качестве линзы финального фокуса для коллайдеров и аналогичных проектов. Исследуются оптимальные положения сегментов постоянных магнитов и условия для создания квадрупольного поля. Приведены характеристики квадрупольного поля, такие как апертура, градиент, интеграл градиента, длина и количество сегментов. Обсуждаются результаты измерений и расчетов, а также возможности для регулировки градиента.

Ключевые слова

постоянные магниты, квадрупольная линза, финальный фокус

Для цитирования

Антохин Е. И., Елисеев В. С., Зуев В. В., Микайылов А. И., Буцыкина М. Д., Пахомов А. Ю., Жилиев К. В., Востриков В. А., Дербышева Т. Р. Квадруполь на постоянных магнитах для финального фокуса // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 3. С. 72–80. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-72-80

Permanent Magnet Quadrupole for the Final Focus

Evgeny I. Antokhin¹, Vladimir S. Eliseev, Vitaly V. Zuev, Adil Mikaiylov
Maria D. Butskina, Alexey Yu. Pakhomov, Konstantin V. Zhiliaev
Vladimir A. Vostrikov, Tania R. Derbysheva

Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation

¹antokhin@inp.nsk.su

Abstract

The paper presents the general theory of permanent multipole magnets and describes the design of a Halbach-2 type quadrupole magnet as a final focus lens for colliders and similar projects. Optimal positions of permanent magnet seg-

*Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

© Антохин Е. И., Елисеев В. С., Зуев В. В., Микайылов А. И., Буцыкина М. Д., Пахомов А. Ю., Жилиев К. В., Востриков В. А., Дербышева Т. Р., 2024

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2024. Том 19, № 3
Siberian Journal of Physics, 2024, vol. 19, no. 3

ments and conditions for quadrupole field generation are investigated. Characteristics of the quadrupole such as aperture, gradient, gradient integral, length and number of segments are given. The results of measurements and calculations as well as the possibilities for gradient adjustment are discussed.

Keywords

permanent magnets, quadrupole lens, final focus

For citation

Antokhin E. I., Eliseev V. S., Zuev V. V., Mikaiylov A. I., Butskina M. D., Pakhomov A. Yu., Zhiliaev K. V., Vostrikov V. A., Derbysheva T. R. Permanent magnet quadrupole for the final focus. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 3, pp. 72–80 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-72-80

Введение

Постоянные магниты широко применяются в ускорителях для создания квадрупольных полей, в том числе для создания квадрупольного поля финального фокуса, который играет решающую роль в качестве фокусировки пучка частиц. В данной статье рассматривается конструкция квадрупольной линзы типа Halbach-2 в качестве линзы финального фокуса для проектов электрон-позитронных коллайдеров.

Общая теория постоянных мультипольных магнитов состоит в определении оптимального положения элемента постоянного магнита на $(r_c; 0)$ с намагниченностью вдоль оси X и элемента, помещенного в произвольный угол $(r_c; \alpha)$, намагниченность которого составляет угол β с осью X (рис. 1).

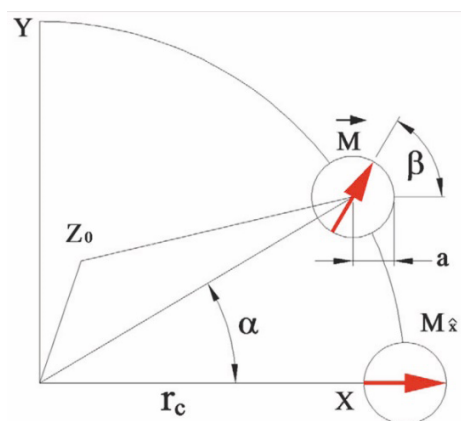


Рис. 1. Диаграмма намагниченности сегментов постоянных магнитов для создания квадрупольного поля

Fig. 1. Magnetization diagram of permanent magnet segments to create a quadrupole field

Формула для определения величины градиента описана в [1–3].

$$G = B_r \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right), \quad (1)$$

где B_r – намагниченность постоянного магнита, r – внутренний радиус, R – внешний радиус.

На практике непрерывное изменение вектора намагниченности элементов заменяют дискретным, т. е. вектор намагниченности имеет постоянное направление в пределах одного и того же сегмента конусообразной формы. При этом для создания квадрупольного поля необходимо выполнить условие: $(\beta_N - 3\alpha_N) = 3\pi/2$, где N находится в пределах от 1 до M (M – количество сегментов).

При выборе количества сегментов постоянных магнитов необходимо учитывать требуемую однородность градиента, а также его величину с одной стороны и технологичность сборки квадрупольа – с другой. Обычно требуется не менее 16 сегментов для создания градиента с достаточно высокой однородностью.

Основные требования к квадрупольу финального фокуса описаны в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры квадрупольа

Table 1

Main parameters of the quadrupole	
Параметр	Значение
Апертура	36 мм
Градиент в центре	(5–6) кГс/см
Интеграл градиента	(40–45) кГс
Однородность интеграла градиента	10^{-3}
Длина квадрупольа	82 мм
Внешний диаметр	75 мм
Постоянные магниты	NdFeB
B_r	1,3 Т

Магнитные расчеты квадрупольа

Для реализации параметров, указанных в табл. 1, была выбрана магнитная конфигурация, состоящая из 24 сегментов с направлениями намагниченности согласно рис. 2.

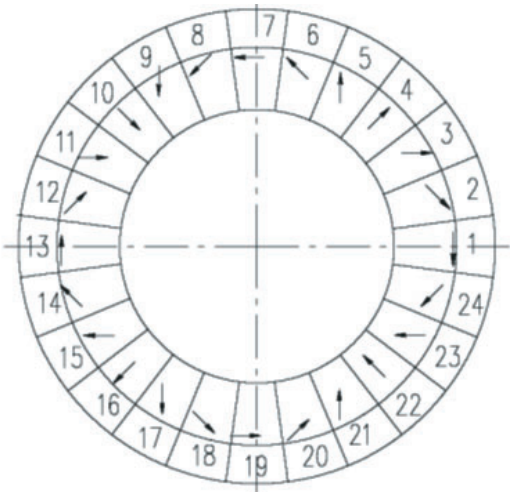


Рис. 2. Расположение намагниченных сегментов и направления векторов намагниченности в них для квадрупольа

Fig. 2. Location of magnetized segments and directions of magnetization vectors in them for a quadrupole

Такое количество сегментов обеспечивает высокую однородность градиента, при этом рассеянное поле снаружи квадруполя почти равно нулю.

Для 3D-метода конечных элементов расчетов квадруполя был использован программный пакет MERMAID [4], общий вид постпроцессора которого изображен на рис. 3.



Рис. 3. Конфигурация магнитных секторов при задании метода конечных элементов в программе магнитостатики MERMAID (показана $\frac{1}{4}$ симметрия)

Fig. 3. Configuration of magnetic sectors when specified in the finite element method of the magnetostatics program MERMAID ($\frac{1}{4}$ symmetry shown)

Расчеты выполнялись с учетом наклона величины намагниченности постоянных магнитов $dM/dH = 1,05$. Точность расчетов соответствует уровню 10^{-4} для безжелезной конструкции.

Рис. 4 показывает однородность градиента в поперечном направлении, а табл. 2 – гармонический состав на радиусе $R = 1$ см.

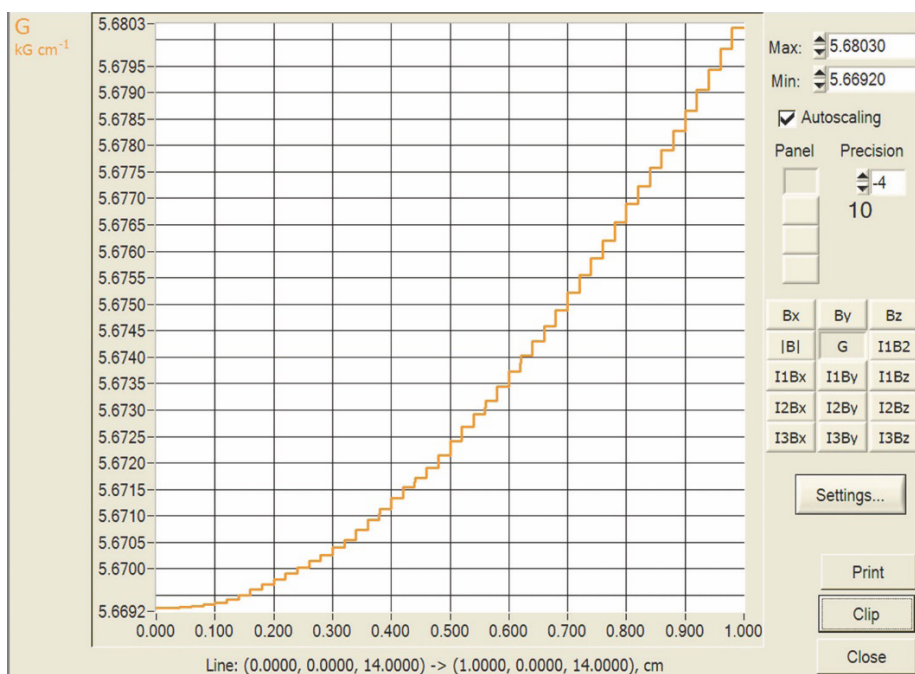


Рис. 4. Однородность градиента в поперечном направлении

Fig. 4. Homogeneity of the gradient in the transverse direction

Таблица 2

Гармонический состав на радиусе $R = 1$ см по результатам расчетов

Table 2

Harmonic composition at the radius $R = 1$ cm according to the results of calculations

Номер гармоники	A_n кГс $\times$ см	B_n кГс $\times$ см
1	0	0
2	41,464	0
3	0	0
4	-0,0004	0
5	0	0
6	-0,024	0
7	0	0
8	-0,000	0
9	0	0
10	-0,022	0
11	0	0
12	-0,0000	0
13	0	0
14	-0,019	0
15	0	0
16	0,000	0
17	0	0
18	-0,018	0

Конструкция квадруполя

При конструировании квадруполя на постоянных магнитах были учтены следующие факторы:

- точность сборки не хуже 0,2 мм;
- необходимость обеспечения повторяемости сборки;
- наличие больших магнитных сил, направление которых меняется при укладке сегментов по азимуту;
- отсутствие размагничивающего поля при установке сегментов.

Для обеспечения вышеупомянутых требований при сборке сегменты постоянных магнитов размещаются на временном технологическом стальном стержне в азимутальном порядке, соответствующем рис. 2. При этом сегменты притягиваются к стальному стержню, что исключает возникновение размагничивающих полей для соседних сегментов. Стальной стержень вместе с сегментами устанавливается внутрь металлического конусообразного корпуса, после чего одновременно происходит обжатие сегментов корпусом и удаление стального стержня. Конструкция квадруполя изображена на рис. 5.

Рис. 6 и 7 показывают изображения собранного квадруполя и отдельных сегментов соответственно. Сегменты вдоль продольного размера выполнены в виде конуса, аналогичную форму имеет бандажирующий металлический корпус. Такая форма квадруполя позволяет более эффективно применять его в качестве финального фокуса, предполагая разлет продуктов реакции вдоль внешнего радиуса квадруполя.

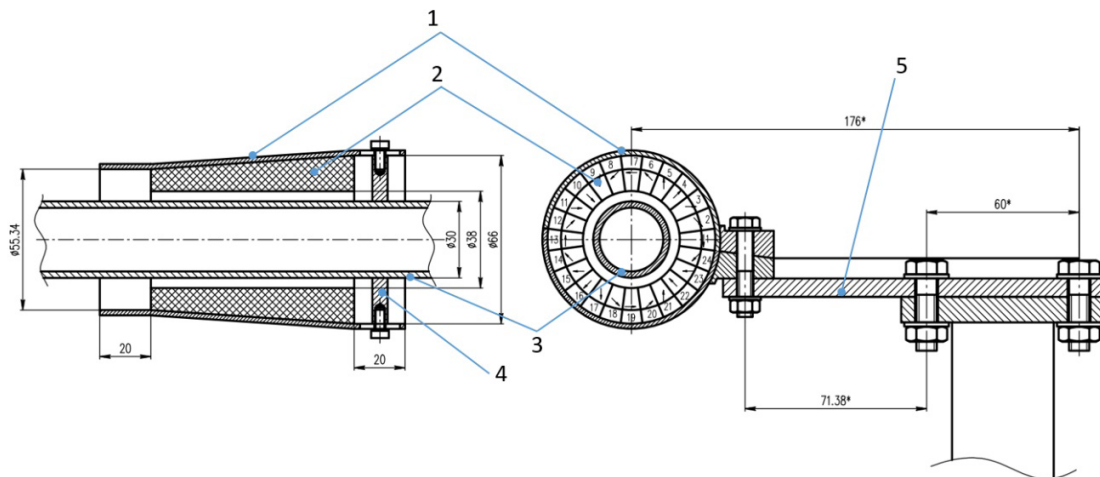


Рис. 5. Конструкция квадрупольной линзы:

1 – корпус; 2 – сегменты постоянных магнитов; 3 – вакуумная камера; 4 – стопорное кольцо; 5 – подставка

Fig. 5. Design of the quadrupole lens:

1 – housing; 2 – permanent magnet segments; 3 – vacuum chamber; 4 – retaining ring; 5 – stand



Рис. 6. Фотография собранного квадрупольа

Fig. 6. Photo of the assembled quadrupole



Рис. 7. Фотография отдельных сегментов постоянных магнитов

Fig. 7. Photograph of individual permanent magnet segments

Результаты измерений

Магнитные измерения проводились вращающейся катушкой на стенде магнитных измерений ИЯФ СО РАН [5]. Рис. 8 показывает общий вид измерительной установки. Табл. 3 представляет измеренный интегральный гармонический состав на $R = 1$ см.

Относительная точность измерений составила порядка 2×10^{-4} с высокой повторяемостью измерений (не хуже 5×10^{-5}).

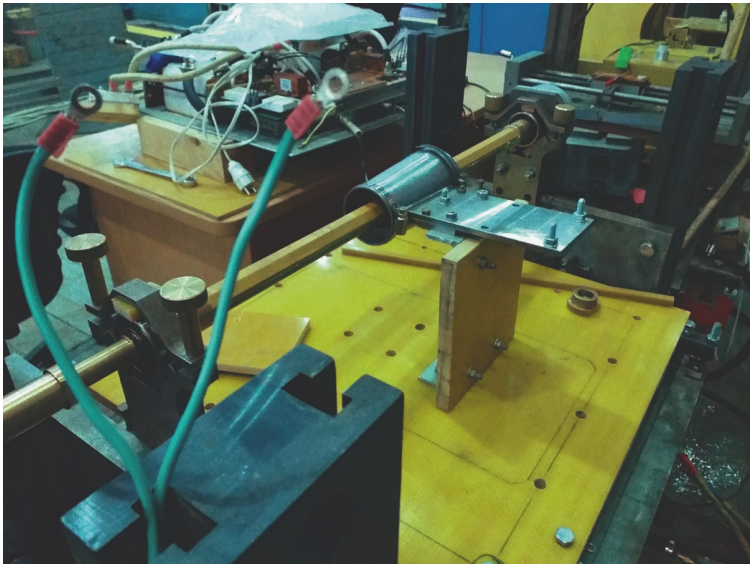


Рис. 8. Общий вид измерительной установки
Fig. 8. General view of the measuring device

Таблица 3

Интегральный гармонический состав, измеренный на $R = 1$ см

Table 3

Integral harmonic composition measured at $R = 1$ cm	
Номер гармоники	Амплитуда, $\text{кГс} \times \text{см}$
1	0,35244
2	38,6402
3	0,22875
4	0,11264
5	0,02687
6	0,02816
7	0,01144
8	0,00976
9	0,00640
10	0,00352
11	0,00410
12	0,00576
13	0,00448
14	0,00392
15	0,00728

Выводы

Измерение квадруполя показывает достижение интеграла градиента порядка 40 кГс при эффективной длине 82 мм (градиент в центре около 4,8 кГс/см). Это хорошо соответствует результатам расчетов для 3D-модели.

Некоторое отличие величины градиента для расчетов и измерений объясняется выбором конической формы сегментов вдоль оси пучка. Такая форма постоянных магнитов не может быть введена точно в программном комплексе MERMAID 3D, а только в виде ступенчатой аппроксимации вдоль оси пучка.

Достигнута однородность интеграла градиента порядка 0,8 %, что объясняется неточностью сборки сегментов и разбросом вектора намагниченности между сегментами. Такая однородность типична для квадруполя данного типа и может быть существенно улучшена введением радиальной регулировки положения каждого сегмента. Сдвиг интегральной магнитной оси вследствие наличия небольшой дипольной компоненты составил 0,1 мм и может быть легко компенсирован общим смещением квадруполя в поперечном направлении.

При дальнейшей работе также предполагается иметь возможность для изменения апертуры квадруполя (изменения величины градиента) путем радиального перемещения сегментов.

Таким образом, квадруполь может быть рекомендован в качестве линзы финального фокуса для проекта с-тау фабрики и других аналогичных проектов.

Список литературы

1. **Ghaith A, Oumbarek D, Kitégi C, Valléau M, Marteau F, Couprie M-E.** Permanent Magnet-Based Quadrupoles for Plasma Acceleration Sources // *Instruments*. 2019. Vol. 3(2). P. 27. <https://doi.org/10.3390/instruments3020027>
2. **Tsoupas N., Brooks S., Jain A., Mahler G., Méot F., Ptitsyn V., Trbojevic D.** Main Magnets and Correctors for the CBETA and eRHIC Projects, and Hadron Facilities // *Physics Procedia*. 2017. Vol. 90. P. 143–150. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2017.09.045>
3. **Blümler P.** Proposal for a permanent magnet system with a constant gradient mechanically adjustable in direction and strength // *Concepts Magn. Reson.* 2016. Vol. 46. P. 41–48. <https://doi.org/10.1002/cmr.b.21320>
4. **Dubrovин A. N.** User's Guide MERMAID: Magnet Design in Two and Three Dimensions. SIM Limited, Novosibirsk Department, 1994.
5. **Mikhailov S., Gavrilov N., Rouvinsky E., Zhiliaev K. et al.** Dipole and quadrupole magnets for the Duke FEL booster // *Proceedings of the 2005 Particle Accelerator Conference*, Knoxville, TN, 16–20 мая 2005 года. Knoxville, TN, 2005. P. 4147–4149. DOI 10.1109/PAC.2005.1591746. – EDN MRFGNL.

References

1. **Ghaith A, Oumbarek D, Kitégi C, Valléau M, Marteau F, Couprie M-E.** Permanent Magnet-Based Quadrupoles for Plasma Acceleration Sources. *Instruments*, 2019, vol. 3(2), p. 27. <https://doi.org/10.3390/instruments3020027>
2. **Tsoupas N., Brooks S., Jain A., Mahler G., Méot F., Ptitsyn V., Trbojevic D.** Main Magnets and Correctors for the CBETA and eRHIC Projects, and Hadron Facilities. *Physics Procedia*, 2017, vol. 90, pp. 143–150. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2017.09.045>.
3. **Blümler P.** Proposal for a permanent magnet system with a constant gradient mechanically adjustable in direction and strength. *Concepts Magn. Reson.*, 2016, vol. 46, pp. 41–48. <https://doi.org/10.1002/cmr.b.21320>
4. **Dubrovин A. N.** User's Guide MERMAID: Magnet Design in Two and Three Dimensions. SIM Limited, Novosibirsk Department, 1994.

5. **Mikhailov S., Gavrilov N., Rouvinsky E., Zhiliaev K. et al.** Dipole and quadrupole magnets for the Duke FEL booster. *Proceedings of the 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, TN*, 16–20 May 2005. Knoxville, TN, 2005, pp. 4147–4149. DOI 10.1109/PAC.2005.1591746. – EDN MRFGNL.

Сведения об авторах

Антохин Евгений Игоревич, научный сотрудник

Елисеев Владимир Сергеевич, инженер-исследователь

Зуев Виталий Викторович, ведущий инженер

Микайылов Адил Ислам оглы, ведущий конструктор

Буцыкина Мария Дмитриевна, лаборант

Пахомов Алексей Юрьевич, младший научный сотрудник

Жиляев Константин Владимирович, младший научный сотрудник

Востриков Владимир Александрович, научный сотрудник

Дербышева Тания Равильевна, аспирант, инженер-исследователь

Information about the Authors

Evgeny I. Antokhin, Research Scientist

Vladimir S. Eliseev, Research Engineer

Vitaly V. Zuev, Leading Engineer

Adil Islam oglu Mikayilov, Lead Designer

Maria D. Butsykina, Laboratory Assistant

Alexey Yu. Pakhomov, Junior Researcher

Konstantin V. Zhilyaev, Junior Researcher

Vladimir A. Vostrikov, Research Scientist

Tania R. Derbysheva, Postgraduate Student, Research Engineer

*Статья поступила в редакцию 15.09.2023; одобрена после рецензирования 13.02.2024;
принята к публикации 04.03.2024*

*The article was submitted 15.09.2023; approved after reviewing 13.02.2024;
accepted for publication 04.03.2024*

Научная статья

УДК 621.384.6

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-81-90

Низкоэнергетический канал транспортировки (LEBT) линейного ускорителя тяжелых ионов*

Екатерина Рамисовна Хабибуллина^{1,3}, Геннадий Николаевич Кропачев^{1,2}
Тимур Вячеславович Кулевой^{1,3}, Ольга Сергеевна Сергеева¹
Ирина Владиславовна Кильметова¹, Владимир Сергеевич Скачков¹
Александр Сергеевич Борисков⁴, Максим Алексеевич Гузов⁴

¹НИЦ «Курчатовский институт»
Москва, Россия

²Объединенный институт ядерных исследований
Дубна, Московская область, Россия

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Москва, Россия

⁴Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики (РФЯЦ – ВНИИЭФ)
Саров, Россия

^{1,3}ekaterina.khabibullina@itep.ru

^{1,2}kropachev@itep.ru

^{1,3}kulevoy@itep.ru

¹sergeeva@itep.ru

¹irina.kilmetova@itep.ru

¹skachkov@itep.ru

⁴ASBoriskov@vniief.ru

⁴maguzov@vniief.ru

Аннотация

В НИЦ «Курчатовский институт» – ККТЭФ (Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики) разрабатывается линейный резонансный ускоритель тяжелых ионов импульсного типа. Канал транспортировки пучков низкой энергии LEBT осуществляет транспортировку пучка от лазерно-плазменного источника многозарядных ионов с A/Z от 4 до 8 (вплоть до Bi^{27+}) до ускорителя с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ). В статье представлены результаты моделирования динамики пучка в канале LEBT с учетом трехмерной карты распределения поля магнитных элементов, обеспечивающие сепарацию рабочей фракции ионного пучка и его согласование с ускоряющей структурой RFQ.

Ключевые слова

LEBT, моделирование динамики пучка, тяжелые ионы

Для цитирования

Хабибуллина Е. Р., Кропачев Г. Н., Кулевой Т. В., Сергеева О. С., Кильметова И. В., Скачков В. С., Борисков А. С., Гузов М. А. Низкоэнергетический канал транспортировки (LEBT) линейного ускорителя тяжелых ионов // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 3. С. 81–90. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-81-90

*Статья по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

Lebt of the Heavy Ion Linear Accelerator

Ekaterina R. Khabibullina^{1,3}, Gennady N. Kropachev^{1,2}, Timur V. Kulevoy^{1,3}
Olga S. Sergeeva¹, Irina V. Kilmetova¹, Vladimir S. Skachkov¹
Alexander S. Boriskov⁴, Maxim A. Guzov⁴

¹NRC “Kurchatov Institute”, Moscow, Russian Federation

²Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow region, Russian Federation

³National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, Russian Federation

⁴FSUE RFNC – VNIIEF, Sarov, Russian Federation

^{1,3}ekaterina.khabibullina@itep.ru

^{1,2}kropachev@itep.ru

^{1,3}kulevoy@itep.ru

¹sergeeva@itep.ru

¹irina.kilmetova@itep.ru

¹skachkov@itep.ru

⁴ASBoriskov@vniief.ru

⁴maguzov@vniief.ru

Abstract

At the NRC “Kurchatov Institute” (Kurchatov Complex for Theoretical and Experimental Physics), the pulsed linear resonant heavy ion accelerator is being developed. The Low Energy Beam Transport (LEBT) channel transports the beam from a laser-plasma source of multi-charged ions with an A/Z ratio from 4 to 8 (up to Bi²⁷⁺) to the RFQ. This paper shares the results of the beam dynamics simulation of the LEBT, which ensures the separation of the working fraction of the ion beam and its matching with the RFQ.

Keywords

LEBT, beam dynamics simulation, heavy ions

For citation

Khabibullina E. R., Kropachev G. N., Kulevoy T. V., Sergeeva O. S., Kilmetova I. V., Skachkov V. S., Boriskov A. S., Guzov M. A. Lebt of the heavy ion linear accelerator. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 3, pp. 81–90 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-81-90

Введение

В рамках проекта по созданию Ускорительного комплекса для Синхротронного комплекса исследований воздействия ионизирующих излучений космического пространства для экспериментальных работ на ионных пучках [1; 2] сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт» – ККТЭФ разрабатывается линейный резонансный ускоритель тяжелых ионов импульсного типа (ЛУ2). ЛУ2 состоит из лазерно-плазменного источника ионов, секции с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ) и двух ускоряюще-фокусирующих каналов с трубками дрейфа (DTL), между которыми расположены каналы согласования (обеспечивающие 6-мерное согласование пучка). Канал транспортировки пучка низкой энергии (LEBT) предназначен для очистки основного сорта ионов с отношением с A/Z от 4 до 8 (вплоть до ²⁰⁹Bi²⁷⁺) от нецелевых компонент, инжектируемых из ЛПИТИ (Лазерно-плазменный источник тяжелых ионов), и осуществляет поперечное согласование пучка с ускоряющей секцией RFQ.

При разработке канала транспортировки пучка низкой энергии учитывались следующие требования:

- использование схемы канала LEBT, состоящей из двух плеч и объединяющего устройства, для обеспечения последовательного (по времени) режима работы для различных типов ионов;
- уменьшение роста поперечного эмиттанта пучка в канале;
- достижение максимальной сепарации основного сорта ионов от примесных частиц;

- обеспечение 4-мерного аксиально-симметричного согласованного пучка ионов $^{209}\text{Bi}^{27+}$ на входе в ускоряющую структуру RFQ;
- компактность: общая длина канала не должна превышать 7 м; максимальное расстояние между плечом, на котором расположена система экстракции, и плечом, где проходит ось ЛУ, не должна превышать 2 м;
- установка вакуумной системы и системы диагностики пучка;
- возможность регулировки поперечных размеров и интенсивности пучка ионов при инжекции в канал LEBT.

Общий эскиз канала представлен на рис. 1 [3].

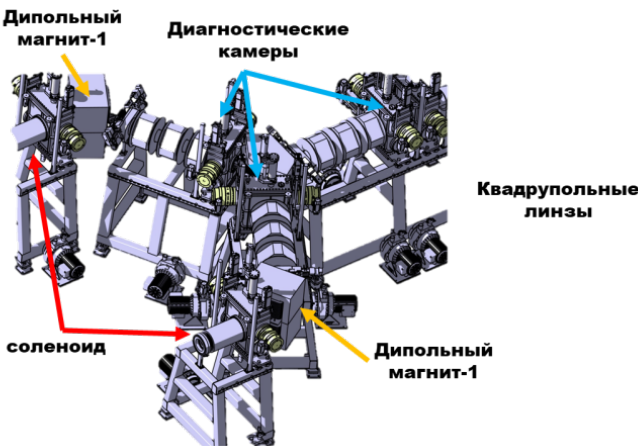


Рис. 1. Макет низкоэнергетического канала LEBT
Fig. 1. Layout of the low-energy LEBT channel

По предварительным расчетам, общий ток пучка на выходе из ЛПИТИ может составлять до 110 мА, что приведет к возникновению значительных по величине сил пространственного заряда, оказывающих дефокусирующее действие при транспортировке ионного пучка. В расчетах динамики пучка учитывалась компенсация объемного заряда на уровне 80 %.

Основные параметры пучка в канале транспортировки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры канала LEBT

Table 1

Main parameters of the LEBT	
Параметр	Значение
Отношение заряда к массе иона	$1/8 \leq Z/A \leq 1/4$
Рабочая фракция пучка, Z	27+(для ^{209}Bi)
Ток пучка, мА	110
Длительность импульса тока, мкс	до 5
Частота повторения импульсов, Гц	до1
Напряжение инжекции, кВ	70
Относительная скорость	0,004334(для $^{209}\text{Bi}^{27+}$)
Общая длина LEBT, м	до 7
Апертура канала, мм	Ø140 (Ø100 – в поворотных магнитах)

Низкоэнергетический канал транспортировки пучка состоит из двух основных участков:

1. Участок s-образного типа, содержащий поворотные магнит для сепарации рабочего сорта иона $^{209}\text{Bi}^{27+}$ от примесей и объединяющий магнит для вывода пучка на ось ЛУ.
2. Прямолинейный участок, обеспечивающий согласование пучка с ускоряющей секцией RFQ.

Схема канала транспортировки LEBT представлена на рис. 2.

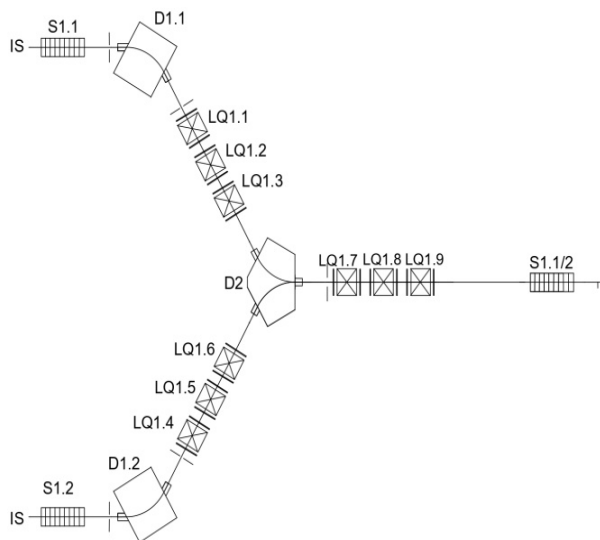


Рис. 2. Общая схема канала транспортировки LEBT: S1.1, S1.2, S1.1/2 – соленоиды; D1.1, D1.2 – поворотные магниты; D2 – объединяющий магнит; LQ1.1-LQ1.9 – квадрупольные электромагнитные линзы; IS – источник ионов; RFQ – ускоритель RFQ

Fig. 2. General layout of the LEBT: S1.1, S1.2, S1.1/2 – solenoids; D1.1, D1.2 – bending magnets; D2 – unifying magnet; LQ1.1-LQ1.9 – quadrupole lenses; IS – ion source; RFQ – RFQ accelerator

Расчет динамики пучка в LEBT

Участок *tuna s-shape*

Расчет динамики пучка проводился с использованием трехмерной карты магнитного поля всех магнитных элементов, включая соленоиды, поворотные магниты [4], квадрупольные линзы [3], разработанные в НИЦ «Курчатовский институт» – ККТЭФ.

Моделирование динамики пучка в канале транспортировки LEBT на участке сепарации проводилось в программе Kobra3-INP [5]. Преимуществами данной программы являются:

- возможность одновременной работы с различными типами ионов;
- учет объемной плотности заряда пучка при его транспортировке;
- возможность задания степени компенсации пространственного заряда;
- использование трехмерных моделей пространственного распределения поля магнитных элементов.

На рис. 3 представлен спектр ионов висмута на выходе системы экстракции при напряжении 70 кВ и общем токе пучка 110 мА.

Первоначальная фокусировка многокомпонентного аксиально-симметричного пучка, выходящего из системы экстракции, происходит с помощью соленоида (рис. 4, а), габаритная длина которого 400 мм, магнитная апертура – 150 мм, величина магнитного поля на оси – 0,87 Тл. После соленоида предусмотрено место для установки вакуумных насосов и диагностического блока. В конце дрейфа располагается диафрагма круглого сечения (рис. 4, б).

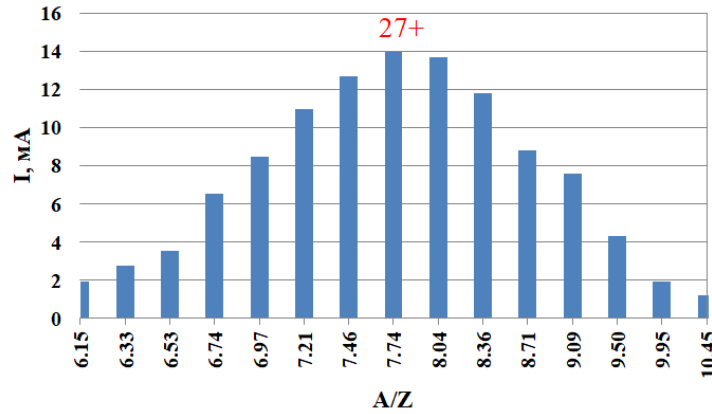


Рис. 3. Спектр ионов Bi_{20-34}^{209} при напряжении инжекции 70 кВ

Fig. 3. Spectrum of Bi_{20-34}^{209} at the injection voltage of 70 kV

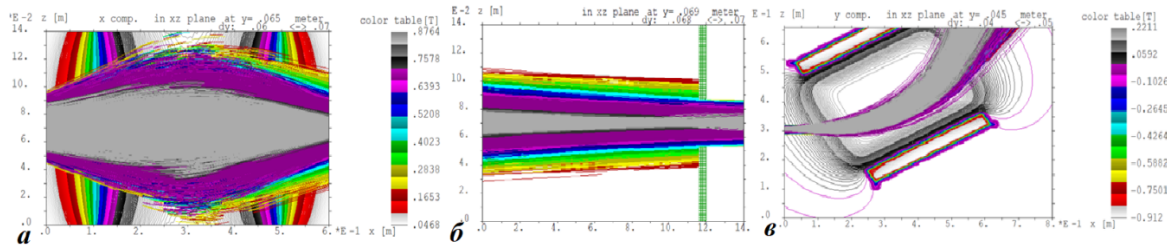


Рис. 4. Траектории движения пучка ионов Bi_{20-34}^{209} в горизонтальной плоскости при прохождении: а – соленоида S1.1; б – диафрагмы круглого сечения SLIT2; в – поворотного магнита D1.1 в канале транспортировки LEBT

Fig. 4. Beam movement of Bi_{20-34}^{209} in the horizontal plane when passing: а – solenoid S1.1; б – circular diaphragm SLIT2; в – bending magnet D1.1

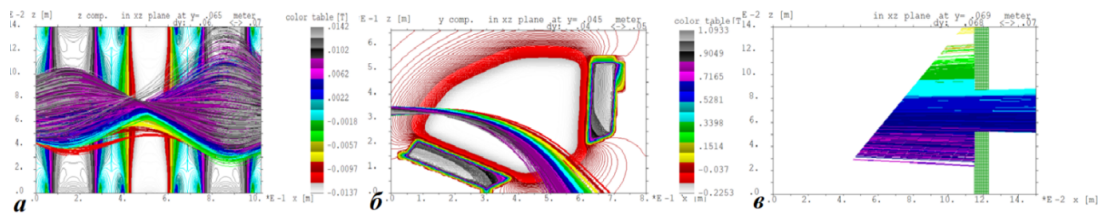


Рис. 5. Траектории движения пучка ионов Bi_{20-34}^{209} в горизонтальной плоскости при прохождении: а – триплета квадрупольных линз LQ1.1-LQ1.3; б – второго поворотного магнита D2; в – третьей диафрагмы прямоугольного сечения SLIT3 в канале транспортировки LEBT

Fig. 5. Beam movement of Bi_{20-34}^{209} in the horizontal plane when passing through: а – triplet of quadrupole lenses LQ1.1-LQ1.3; б – second bending magnet D2; в – rectangular diaphragm SLIT3

Основное разделение частиц происходит в отклоняющем диполе с углом поворота 60° и скосами $30^\circ/30^\circ$ градусов (рис. 4, в), после которого устанавливается диафрагма, состоящая из пары подвижных пластин. Состоящая из поворотного и объединяющего магнитов (рис. 5, б) и триплета квадрупольных линз между ними (рис. 5, а) структура является ахроматической, что позволяет избежать дополнительного роста эмиттанса в плоскости поворота.

После объединяющего магнита на расстоянии ≈ 100 мм установлена прямоугольная диафрагма для заключительной очистки рабочей фракции от примесных частиц (рис. 5, в). На рис. 6 представлен полученный спектр ионов висмута на выходе из последней диафрагмы. Общий ток пучка после диафрагмы – 11,5 мА, в котором содержится 5,2 мА основного сорта ионов.

Предполагается, что окончательная сепарация ионов висмута произойдет в магнитных элементах между ускоряющими секциями RFQ и DTL.

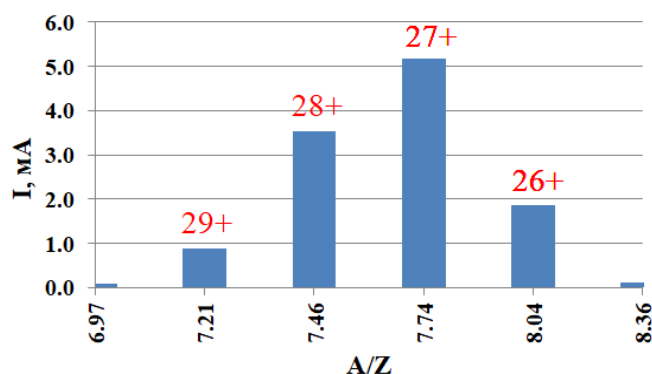


Рис. 6. Спектр пучка ионов Bi_{25-30}^{209} после прохождения диафрагмы SLIT3

Fig. 6. Spectrum of the Bi_{25-30}^{209} after transportation through the SLIT3 diaphragm

Участок согласования с RFQ

Моделирование динамики пучка на участке согласования LEBT с ускоряющей секцией RFQ проводилось в программе TraceWin [6] с визуализацией в среде PlotWin [7].

Требования, предъявляемые к прямолинейного участка согласования пучка с ускоряющей секцией RFQ:

- поперечное согласования пучка с входными рассчитанными параметрами RFQ;
- использование аналогичных магнитных элементов, что и на участке сепарации;
- планирование места расположения диагностического и вакуумного оборудования (≈ 700 мм);
- учет продольных размеров монтажных элементов (соединительных фланцев, шибера, переходного монтажного патрубка и т. д.) при их установке перед структурой RFQ (≈ 300 мм).

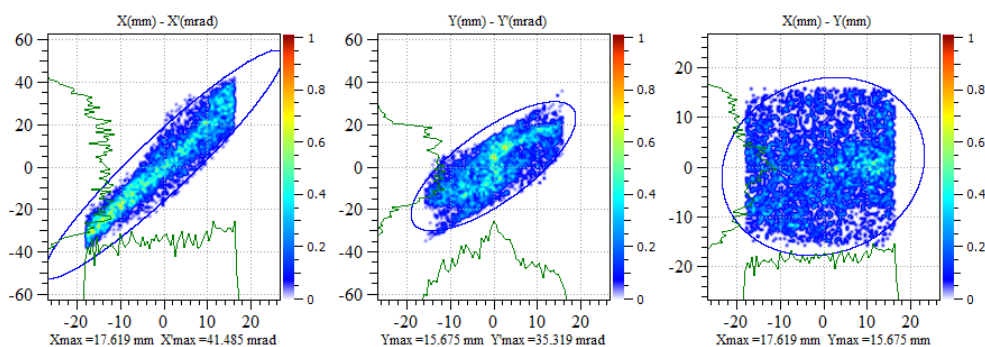


Рис. 7. Фазовый портрет пучка на выходе диафрагмы SLIT3

Fig. 7. Beam phase portrait at the output of the SLIT3 diaphragm

Расчет динамики движения пучка проводился для ионов Bi_{27+}^{209} при токе 11,5 мА, что соответствует току пучка для всего спектра висмута и позволяет учитывать эффект кулоновского

расталкивания всего пучка. В качестве входных параметров ионов на участке согласования использовались фазовые характеристики пучка на выходе последней диафрагмы SLIT3 (рис. 7).

Основными магнитооптическими элементами данного участка являются:

– триплет квадрупольных линз, регулирующий пучок в двух взаимно перпендикулярных направлениях;

– соленоид, обеспечивающий сходящийся аксиально-симметричный пучок на входе в RFQ.

Огибающие пучка в канале транспортировки LEBT приведены на рис. 8.

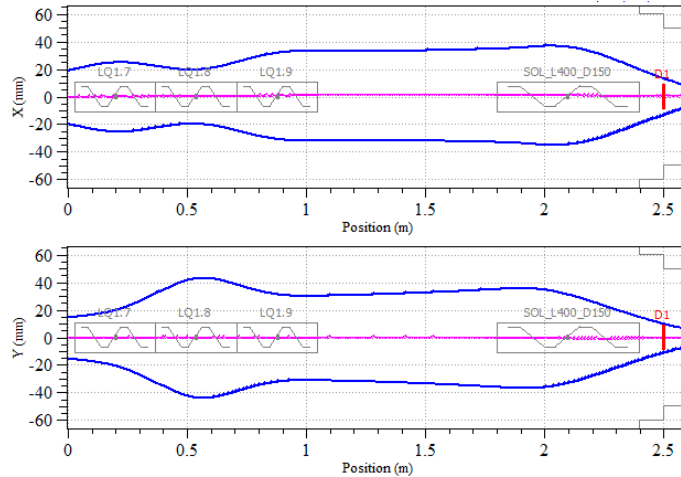


Рис. 8. Огибающие пучка на участке согласования в канале LEBT

Fig. 8. Beam envelopes in the matching section of the LEBT

Фазовые портреты пучка на выходе канала LEBT при токе 11,5 мА для ионов Bi_{27+}^{209} представлены на рис. 9.

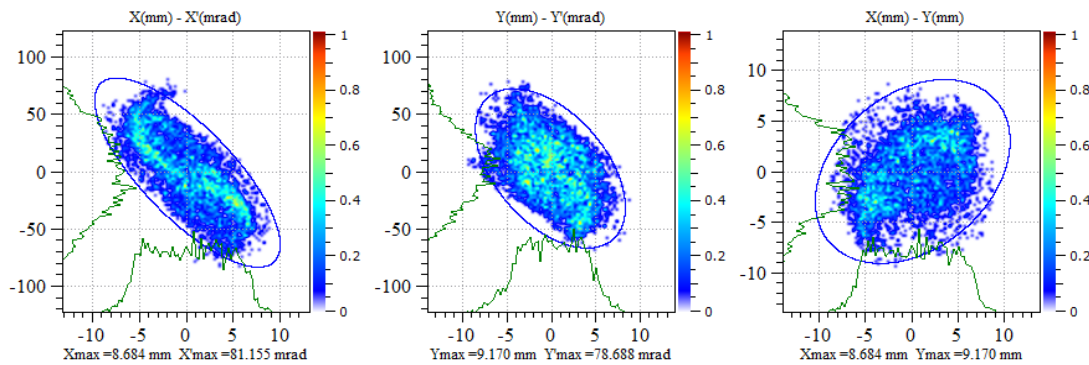


Рис. 9. Фазовый портрет пучка на выходе канала LEBT

Fig. 9. Beam phase portrait at the output of the LEBT

В результате моделирования динамики пучка величина нормализованного среднеквадратичного эмиттанта составила $0.33 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ в горизонтальной и вертикальной плоскости, что в 1,3 раза больше расчетного значения на входе в RFQ ($0.25 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$). Это объясняется неизбежным ростом поперечного эмиттанта за счет кулоновских сил отталкивания и влиянием нелинейных полей фокусирующих элементов на пучок частиц. В качестве начального условия для расчета входных параметров пучка в RFQ использовалась методика И. М. Капчинского [8]: отношение нормализованного аксептанта к нормализованному входному эмиттансу принято

$V_k/\varepsilon_{\text{inip}} = 3$. Значения поперечных эмиттансов в LEBT, полученных в результате моделирования, далеки от критических, что позволяет ускорять пучок в RFQ без потерь. Импульсный разброс частиц в пучке сохраняется на уровне $\pm 0,5\%$, что удовлетворяет входным требованиям RFQ.

Основные параметры электромагнитных элементов канала LEBT, используемых при моделировании динамики пучка, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные параметры магнитных элементов канала LEBT

Table 2

Main parameters of the LEBT magnetic elements

Название	Значение	Ед. изм.
Соленоид S1.1		
Магнитное поле на оси, B_{SOL1}	0,87	Тл
Продольная длина, L	400	мм
Магнитная апертура, D_{ap}	150	мм
Поворотный магнит D1.1/D2		
Угол поворота, θ	60/–60	°
Скосы, φ	30 / 30 –D1.1; 30°/0° – D2	°
Радиус поворота осевой траектории, R	400	мм
Межполюсный зазор, D_{ap}	108	мм
Магнитное поле на оси, $B_{\text{D1.1/D2}}$	0,245	Тл
Триплет квадрупольных линз LQ1.1-LQ1.3		
Длина, L/L_{shim}	180/252	мм
Градиент, G	2,71/–2,67/2,71	Тл /м
Апертура, D_{ap}	150	мм
Триплет квадрупольных линз LQ1.7-LQ1.9		
Длина, L/L_{shim}	180/252	мм
Градиент, G	1,42/–1,65/0,79	Тл /м
Апертура, D_{ap}	150	мм
Соленоид S1/2		
Магнитное поле на оси, B_{SOL2}	0,56	Тл
Продольная длина, L	400	мм
Апертура, D_{ap}	150	мм

Заключение

На основании расчета динамики пучка был разработан проект канала транспортировки пучков низкой энергии (LEBT) и подготовлен комплект конструкторской документации (сборочного чертежа) на изготовление основных узлов канала.

Канал общей длиной 5,5 м состоит:

- из фокусирующего соленоида;
- транспортной линии типа s-shape, состоящего из поворотного и объединяющего магнитов и триплета квадрупольных линз между ними;

– прямолинейного участка, включающего триплет квадрупольных линз и соленоида, обеспечивающего согласованный аксиально-симметричный пучок на входе в ускоряющую структуру RFQ.

Динамические расчеты в канале LEBT проводились с использованием трехмерной карты магнитного поля элементов магнитной оптики: соленоида, квадрупольной линзы, поворотного и объединяющего магнитов. Разработанный канал позволяет расположить требуемое оборудование для диагностики пучка и вакуумной откачки ионопровода LEBT.

Минимизации роста поперечного эмиттанта в LEBT удалось достичь путем создания ахроматической структуры на участке отклонения пучка и снижения общего тока многокомпонентного пучка за счет усиленной фильтрации нецелевых фракций.

Список литературы

1. **Завьялов Н. В.** Исследовательские установки РФЯЦ – ВНИИЭФ для экспериментального получения фундаментальных и прикладных знаний в области ядерной, радиационной физики и физики быстропротекающих процессов // *Успехи физических наук*. 2021. Т. 191. № 9.
2. **Будников Д. В. и др.** Ядерные и электрофизические установки РФЯЦ – ВНИИТФ: настоящее и будущее // *ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов*. В 4. 2021. С. 5–25.
3. **Кулевой Т. В. и др.** Линейный ускоритель тяжелых ионов ЛУ2 для синхротронного исследовательского комплекса (СКИ) // *ПТЭ*. 2024 (в печати).
4. **Кильметова И. В. и др.,** Магнитные элементы низкоэнергетического канала для ускорителя тяжелых ионов // *ПТЭ*. 2024 (в печати).
5. Spädtke Kobra3-INP Manual, September, 2005.
6. **Uriot D., Pichoff N.** Status of TraceWin Code, Proceedings of IPAC2015, Richmond, VA, USA, 2015. P. 92–94.
7. PlotWin(CEA-SACLAY). URL: <http://irfu.cea.fr/en/Phoceas/Page/index.php?id=263> (дата обращения: 05.07.2021).
8. **Карпинский И. М.** Particle dynamics in linear resonance accelerators // *Atomizdat*. 1966. P. 274.

References

1. **Zavyalov N. V.** Research facilities of the RFNC-VNIIEF for the experimental acquisition of fundamental and applied knowledge in the field of nuclear, radiation physics and physics of fast processes. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 2021, vol. 191, no. 9. (in Russ.)
2. **Budnikov D. V. et al.** Nuclear and electrophysical installations of the RFNC-VNIITF: present and future. *VANT Series: physics of nuclear reactors*, B4, 2021, pp. 5–25. (in Russ.)
3. **Kulevoy T. V. et al.** Linear accelerator of heavy ions LU2 for the synchrotron research complex (SRC). *Instruments and Experimental Techniques*, 2024 (accepted to print) (in Russ.)
4. **Kilmetova I. V. et al.** Magnetic elements of a low-energy channel for a heavy-ion accelerator. *Instruments and Experimental Techniques*, 2024 (accepted to print) (in Russ.)
5. Spädtke Kobra3-INP Manual. September, 2005.
6. **Uriot D., Pichoff N.** Status of TraceWin Code. *Proceedings of IPAC2015*, Richmond, VA, USA, pp. 92–94.
7. PlotWin(CEA-SACLAY). URL: <http://irfu.cea.fr/en/Phoceas/Page/index.php?id=263> (accessed on 05.07.2021).
8. **Карпинский И. М.** Particle dynamics in linear resonance accelerators. *Atomizdat*, 1966, p. 274. (in Russ.)

Сведения об авторах

Хабибуллина Екатерина Рамисовна, младший научный сотрудник

Кропачев Геннадий Николаевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник

Кулевой Тимур Вячеславович, доктор технических наук, зам. руководителя ККТЭФ по прикладным научным исследованиям и экспериментальным установкам»

Сергеева Ольга Сергеевна, инженер-программист

Кильметова Ирина Владиславовна, инженер

Скачков Владимир Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Борисков Александр Сергеевич, младший научный сотрудник

Гузов Максим Алексеевич, инженер-исследователь

Information about the Authors

Ekaterina R. Khabibullina, Junior Researcher

Gennady N., Kropachev, Ph.D. in Physics and Mathematics Sciences, Leading Researcher

Timur V. Kulevoy, Doctor of Engineering Sciences, Deputy Head of KCTEP for applied scientific research and experimental installations

Olga S. Sergeeva, Software Engineer

Irina V. Kilmetova, Engineer

Vladimir S., Skachkov, Ph.D. of Engineering Sciences, Senior Researcher

Alexander S. Boriskov, Junior Researcher

Maxim A. Guzov, Research Engineer

*Статья поступила в редакцию 11.09.2023; одобрена после рецензирования 29.09.2023;
принята к публикации 05.03.2024*

*The article was submitted 11.09.2023; approved after reviewing 29.09.2023;
accepted for publication 05.03.2024*

Научная статья

УДК 621.785:669.1.08.29

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-91-108

Структура и свойства электровзрывного покрытия системы $\text{TiB}_2\text{--Ag}$ после электронно-пучковой обработки

Василий Витальевич Почету́ха¹, Денис Анатольевич Романов²
Екатерина Степановна Ващук³, Артем Дмитриевич Филяков⁴
Виктор Евгеньевич Громов⁵

Сибирский государственный индустриальный университет
Новокузнецк, Россия

¹v.pochetuha@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0492-6188>

²romanov_da@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6880-2849>

³vaschuk@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1345-7419>

⁴filyakov.1999@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8168-8809>

⁵gromov@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>

Аннотация

Произведено формирование покрытия системы $\text{TiB}_2\text{--Ag}$ посредством применения последовательных операций электровзрывного напыления и электронно-пучковой обработки. Определены значения электропроводности ($62,0 \text{ МСм/м}$), микротвердости по Виккерсу ($0,251\text{--}0,265 \text{ ГПа}$ в месте замера на серебряной матрице и $25\text{--}32 \text{ ГПа}$ в месте замера на включениях боридных фаз), нанотвердости ($4,48 \pm 0,76 \text{ ГПа}$), модуля Юнга ($116 \pm 29 \text{ ГПа}$), параметра износа в условиях сухого трения-скольжения ($1,2 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$) и коэффициента трения ($0,5$). Коммутационная износостойкость в ходе ускоренных испытаний составила 7000 циклов включения и отключения при электрическом сопротивлении $10,01\text{--}11,76 \text{ мкОм}$. Толщина покрытий составляет 100 мкм . Покрытия образованы серебряной матрицей с расположенными в ней включениями боридов титана с размерами трех типов: нанокристаллический, субмикрокристаллический и микрокристаллический. Количественно в структурной композиции среди боридов титана преимущественно ($41 \text{ мас. \%}$) формируется диборид титана, и серебро ($56 \text{ мас. \%}$), на другие бориды титана приходится $3 \text{ мас. \%}$. Структурные трансформации описаны с применением взаимодополняющих методов рентгенофазового анализа, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии.

Ключевые слова

покрытие $\text{TiB}_2\text{--Ag}$, электровзрывное напыление, электронно-пучковая обработка, структура, коммутационная износостойкость, электропроводность, микротвердость, нанотвердость, модуль Юнга, износостойкость, коэффициент трения

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10012, <https://rscf.ru/project/22-79-10012/>

Для цитирования

Почету́ха В. В., Романов Д. А., Ващук Е. С., Филяков А. Д., Громов В. Е. Структура и свойства электровзрывного покрытия системы $\text{TiB}_2\text{--Ag}$ после электронно-пучковой обработки // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 3. С. 91–108. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-91-108

Structure and Properties of the Electroexplosive Coating of the TiB_2 –Ag System after Electron Beam Treatment

Vasily V. Pochetukha¹, Denis A. Romanov², Ekaterina S. Vashchuk³
Artem D. Filyakov⁴, Viktor E. Gromov⁵

Siberian State Industrial University
Novokuznetsk, Russian Federation

¹v.pochetuha@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0492-6188>

²romanov_da@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6880-2849>

³vaschuk@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1345-7419>

⁴filyakov.1999@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8168-8809>

⁵gromov@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>

Annotation

A coating of the TiB_2 –Ag system was formed through the use of sequential operations of electroexplosive spraying and electron beam processing. The values of electrical conductivity (62.0 MS/m), Vickers microhardness (0.251–0.265 GPa at the point of measurement on a silver matrix and 25–32 GPa at the point of measurement at inclusions of boride phases), nanohardness (4.48 ± 0.76 GPa) were determined, Young's modulus (116 ± 29 GPa), wear parameter under dry friction-sliding conditions ($1.2 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$) and friction coefficient (0.5). Switching wear resistance during accelerated tests was 7000 on and off cycles with an electrical resistance of 10.01 – 11.76 μOhm . The thickness of the coatings is 100 microns. The coatings are formed by a silver matrix with inclusions of titanium borides located in it with three types of sizes: nanocrystalline, submicrocrystalline and microcrystalline. Quantitatively, in the structural composition among titanium borides, titanium diboride and silver (56 wt. %) are formed predominantly (41 wt. %), while other titanium borides account for 3 wt. %. Structural transformations are described using complementary methods of X-ray phase analysis, scanning and transmission electron microscopy.

Keywords

TiB_2 –Ag coating, electroexplosive sputtering, electron beam processing, structure, commutation wear resistance, electrical conductivity, microhardness, nanohardness, Young's modulus, wear resistance, friction coefficient

Funding

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-79-10012, <https://rscf.ru/project/22-79-10012/>

For citation

Pochetukha V. V., Romanov D. A., Vashchuk E. S., Filyakov A. D., Gromov V. E. Structure and Properties of the Electroexplosive Coating of the TiB_2 –Ag System after Electron Beam Treatment. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 3, pp. 91–108 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-91-108

Введение

Электрические контакты играют ключевую роль в области машиностроения и электротехники. Среди них композиционные контакты на основе серебра с прошлого века широко применяются в низковольтных коммутационных системах (контакторах, прерывателях, реле и т. п.) с широкой токовой нагрузкой [1; 2]. В целом, особенности армирующей фазы и ее структура интерфейса с серебряной подложкой в основном определяют работоспособность и надежность контактной системы [3; 4]. Приемлемые электроконтактные характеристики контактов системы CdO –Ag объясняются хорошей дисперсией армирующей фазы CdO и ее прочной межфазной связью с серебром [5]. Однако образование токсичных паров кадмия при электрическом контакте серьезно угрожает здоровью человека и окружающей среде [6; 7]. Свойства современных армирующих фазовых заменителей CdO до сих пор не удовлетворены, например SnO_2 [8], ZnO [9], CuO [10], Al_2O_3 [11], B_2O_3 [12], TiC [13], TiB_2 [14]. Поиск новой экологически безопасной фазы армирования для замены CdO осложнен рядом проблем.

С 2000 г. исследуется новый вид нетоксичной слоистой металлической керамики: МАХ-фазы [15–17]. В последние годы такие МАХ-фазы, как Ti_3AlC_2 [18–20], Ti_3SiC_2 [21–23], Ti_2AlC [24; 25], Ti_2SnC [26; 27] используются для армирования серебряной подложки. Они обладают хорошими характеристиками электропроводности, теплопередачи, твердости, механи-

ческими свойствами. В частности, композиционные электрические контакты Ag-МАХ-фаза также продемонстрировали превосходную защиту от сваривания и низкий перенос материала в процессе электрического контакта [28–30]. Стойкость композитов Ag-МАХ-фаза к дуговой коррозии указывает на то, что керамическая МАХ-фаза может потенциально заменять токсичную фазу CdO . Однако механизм устойчивости к электродуговой коррозии композитов на основе Ag, армированных МАХ-фазами, до сих пор не систематичен и требует дальнейшего изучения.

Покрyтия системы TiB_2 -Ag используются при коммутации тяжелогазуженных контактов переключателей мощных электрических сетей с целью обеспечения длительной стабильной работы контактной пары. Кроме этого, такие покрытия используются для коммутации и других электрических контактов, например, контакторов, пускателей, реле и т. д. В процессе коммутации важны следующие свойства таких покрытий:

- физико-химические свойства: температура плавления, плотность, теплопроводность, электропроводность, твердость, пластичность, упругость;
- устойчивость коррозии и дуговой эрозии, способность к свариванию, стойкость к окислению;
- механические и электрические нагрузки;
- свойства окружающей среды (температура, влажность, состав смеси газов).

Авторы настоящей статьи также получали композиционные покрытия системы CdO -Ag электровзрывным методом [28]. Данные покрытия демонстрировали высокий уровень свойств. В настоящем исследовании для создания композиционного покрытия, применение которого в первую очередь направлено на повышение работоспособности контактов переключателей мощных электрических сетей, в качестве наполнителя выбран диборид титана, а в качестве матрицы – серебро. В качестве метода формирования покрытия системы TiB_2 -Ag выбран метод электровзрывного напыления как один из перспективных современных методов формирования высоконадежных покрытий. В качестве дополнительной финишной обработки электровзрывных покрытий выбрана электронно-пучковая обработка как одна из прогрессивных методик повышения однородности поверхности, гомогенизации структуры покрытий и наноструктурирования. Целью данного исследования являлся синтез покрытий системы TiB_2 -Ag методом электровзрывного напыления и электронно-пучковой обработки на медной подложке, а также исследование структуры, фазового состава и свойств: нанотвердости, модуля Юнга, износостойкости, коэффициента трения, электроэрозионной стойкости в условиях дуговой эрозии. Исследовалась возможность разработки композиционного покрытия с серебряной матрицей с превосходными общими характеристиками и хорошей стойкостью к дуговой эрозии. Удовлетворить тенденцию экономии серебра в области материалов для электрических контактов и внести свой вклад в разработку композиционных материалов и покрытий для электрических контактов являлось глобальной целью данной статьи.

1. Материал и методики исследования

1.1. Получение композиционных покрытий

Исходными материалами для формирования электровзрывных покрытий системы TiB_2 -Ag выступали порошок диборида титана и серебряная фольга. На рис. 1 показана морфологическая характеристика исходного порошка диборида титана, полученная с помощью сканирующего электронного микроскопа. Порошок диборида титана обладал чистотой $\geq 99,9\%$ и средним размером частиц $\leq 2,5$ мкм. Химический состав серебряной фольги, масс. %: Ag 99,9; Pb 0,003; Fe 0,035; Sb 0,002; Bi 0,002; Cu 0,058. Масса серебряной фольги составляла 400 мг, а порошка диборида титана – 200 мг. Порошок диборида титана был равномерно распределен по поверхности серебряной фольги. Использовали установку для электровзрывного напыления по-

крытий «EESM Romanov» (инновационная разработка 2023 г. лаборатории электровзрывного напыления высоконадежных покрытий Сибирского государственного индустриального университета, г. Новокузнецк). Поглощаемая плотность мощности при электровзрывном напылении составляла $5,5 \text{ ГВт/м}^2$. Формирование покрытия происходило на медной мишени-подложке с размерами $25 \times 25 \times 5 \text{ мм}$ со следящим химическим составом, масс. %: Cu 99,99; Fe 0,001; Ni 0,001; S 0,001; P 0,001; As 0,001; Pb 0,001; Zn 0,001; Ag 0,001; O 0,0005; Sb 0,0005; Bi 0,0005; Sn 0,0005. Процесс электровзрывного напыления осуществляли при следующих параметрах: время воздействия плазмы на поверхность образца $\sim 100 \text{ мкс}$, поглощаемая плотность мощности на оси струи $\sim 5,5 \text{ ГВт/м}^2$, давление в ударно-сжатом слое вблизи облучаемой поверхности $\sim 12,5 \text{ МПа}$, остаточное давление газа в рабочей камере $\sim 100 \text{ Па}$; температура плазмы на срезе серебряного сопла $\sim 10^4 \text{ }^\circ\text{C}$.

Суть метода электровзрывного напыления покрытия системы $\text{TiB}_2\text{--Ag}$ заключается в электрическом взрыве фольги из серебра с размещенным на ней порошком диборида титана, формировании из продуктов взрыва импульсной многофазной плазменной струи, оплавлении ею медной поверхности, осаждении на поверхность продуктов взрыва, формировании на ней композиционного покрытия на основе диборида титана и серебра.

Работа плазменного ускорителя для электровзрывного напыления основана на накоплении энергии батареей импульсных конденсаторов до величин порядка $1\text{--}10 \text{ кДж}$ и ее последующем разряде через проводник, испытывающий при этом взрывное разрушение. Повышение массовой плотности продуктов взрыва, а также интенсивности теплового воздействия на поверхность модифицируемого материала до значений, достаточных для ее оплавления за малое время импульса, которое не превышает $1\text{--}2 \text{ мс}$, и тем самым создание условий, необходимых для осуществления напыления, достигается применением торцевой коаксиальной системы электродов. Для этого тонкий проводник, например, металлическую фольгу, закрепляют на торцах двух электродов: внутреннего токоподводящего, имеющего форму цилиндрического стержня, и внешнего кольцевого. На электроды через разрядник подают регулируемое электрическое напряжение.

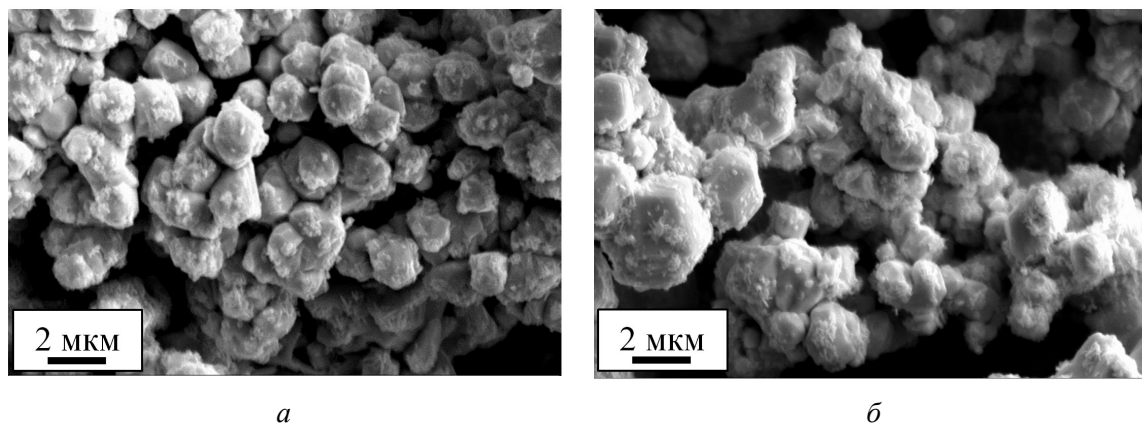


Рис. 1. Морфология исходного порошка диборида титана на случайно выбранных участках 1 (а) и 2 (б) исследуемой порошковой навески

Fig. 1. Morphology of the initial titanium diboride powder in randomly selected areas 1 (a) and 2 (b) of the powder sample under study

Принцип действия установок для электровзрывного напыления основан на разрушении материала покрытия мощным импульсом электрического тока, который формируется при разряде емкостного накопителя энергии. При разряде емкостного накопителя участок проводника в виде фольги, расположенный над внутренним электродом, образует плазменный фронт

формируемой многофазной струи. Периферийная же область становится источником конденсированных частиц продуктов взрыва, располагающихся в тылу формируемой струи. Соотношение между плазменной и конденсированной компонентами продуктов взрыва по оси струи изменяется непрерывно. В ходе распространения струи происходит дальнейшее разделение ее быстрого плазменного фронта и относительно медленного тыла, включающего конденсированные частицы. Это связано с тем, что чем меньше размеры частиц, тем больше их скорость.

Обработка медной мишени-подложки с электровзрывным покрытием системы TiB_2 -Ag осуществлялась импульсным электронным пучком, генерируемым на установке «СОЛО» в режиме 60 Дж/см², 200 мкс, 30 имп., 0,3 с⁻¹. Данные параметры обработки поверхности электронным пучком были выбраны с учетом опыта аналогичной обработки электровзрывных покрытий других систем на основе серебра [28].

1.2. Методики исследования свойств композиционных покрытий

Метод измерительного индентирования на приборе NIOS Standard использовали для определения нанотвердости и модуля Юнга по невосстановленному отпечатку путем измерения зависимости нагрузки от глубины внедрения индентора. Прикладываемая нормальная (вертикальная) нагрузка составляла 20 мН, разрешение по нагрузке – 10 мкН, разрешение перемещения индентора – 1 нм. В качестве индентора выступал алмазный наконечник Берковича.

Исследования микротвердости проводились на поперечных шлифах сформированных покрытий с использованием микротвердомера KB10S с использованием алмазной пирамиды Виккерса при поддержании нагрузки 10 кгс.

Исследование трибологических характеристик производили в соответствии со стандартом ASTM G133 во вращательном режиме на трибометре Pin on Disc and Oscillating TRIBOtester (TRIBOtechnic, Франция). Измерения реализовывались при температуре 28 °С в режиме износа «по кругу» с диаметром трека 4 мм, без смазки, нагрузка на контртело (шар шведского производства из твердого сплава MC241 диаметром 6 мм) составляла 2 Н, скорость вращения поддерживалась с высокой точностью за счет применения обратной связи и составляла 0,025 м/с, путь, пройденный контртелом, – 50 м. Для точного измерения объема канавки износа и расчета интенсивности износа трибометр был оборудован 3D бесконтактным оптическим нанопрофилометром.

На электроэрозионную стойкость с определением числа циклов коммутаций (включения и отключения) медные контакты с нанесенным покрытием испытывали в составе электромагнитных пускателей серии CJ20. Для испытаний использовали режим АС-3 при работе в трехфазной цепи с переменным током и индуктивной нагрузкой, номинальное напряжение составляло 400/230 В, частота 50 Гц для токов до 320 А и $\cos\varphi = 0,35$.

Электропроводность покрытий измеряли с применением цифрового тестера электропроводности Sigma 2008B1 (производство Китай, модель выпуска 2023 г.). На поверхности покрытия выбирали 10 участков, после чего измеряли и усредняли электропроводность.

1.3. Методики исследования структуры композиционных покрытий

Анализ и определение микроструктуры покрытий, распределение элементов производили с помощью сканирующего электронного микроскопа KYKY-EM 6900 (произведен в Китае, модель выпуска 2022 г.).

Микроструктуру образцов анализировали с помощью универсального термополевого просвечивающего электронного микроскопа JEOL JEM-2100 (произведен в Японии) с приставкой для рентгеновского микроанализа Oxford Instruments INCA Energy. Для проведения исследований методом просвечивающей электронной микроскопии готовили образцы в виде тонких фольг типа “cross-section”. Для этого из исходных образцов вырезались заготовки размером

4×1×1 мм (рис. 2, а). Вырезанные заготовки механически шлифовались до 160 мкм, а затем склеивались эпоксидной смолой обработанными поверхностями (рис. 2, б). Далее заготовки помещались в систему ионного утонения Ion Slicer EM-09100 IS и готовились при ускоряющем напряжении 7 кВ до тех пор, пока не происходила перфорация в области склейки (рис. 2, в). По краям образовавшейся перфорации расположены тонкие области, пригодные для ПЭМ-исследований.

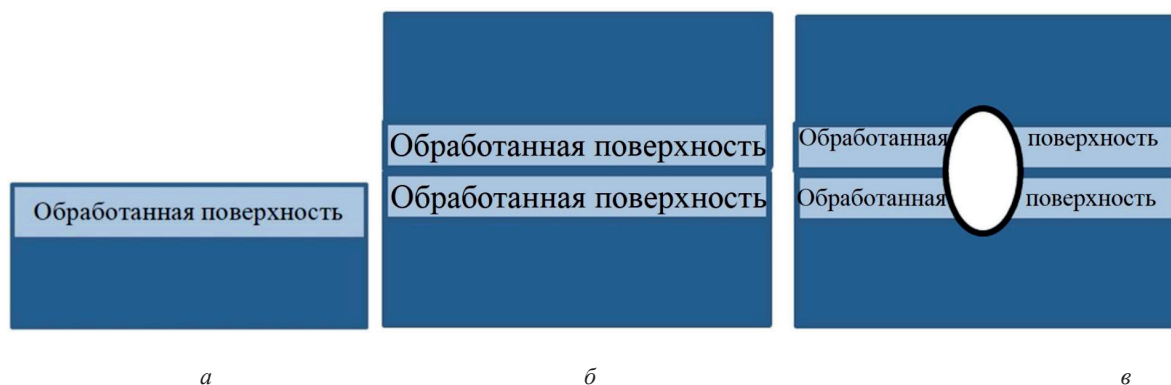


Рис. 2. Схема приготовления фольг для исследований методом просвечивающей электронной микроскопии:
а – заготовка размером 4×1×1 мм; б – склеенные эпоксидной смолой обработанными поверхностями заготовки;
в – перфорация в области склейки (указана овалом)

Fig. 2. Scheme for preparing foils for transmission electron microscopy studies:
а – workpiece measuring 4×1×1 mm; б – workpieces glued with epoxy resin with treated surfaces;
в – perforation in the gluing area (indicated by an oval)

Покрытия исследовались методом рентгенофазового анализа. Каждый образец снимался дважды. Первая съемка – скоростная, для общего представления, вторая – в асимметричной геометрии для более детального изучения покрытия, а не подложки. Съемки осуществлялись на рентгеновском дифрактометре ДРОН-8Н (произведен в России, модель выпуска 2023 г.), оснащенном параболическим зеркалом на первичном пучке и позиционно-чувствительным детектором Mythen 2R 1D (640 каналов, размер одного стрипа – 50 мкм). Ускоряющее напряжение, подаваемое на рентгеновскую трубку, составляло 40 кВ, ток – 20 мА. Съемки осуществлялись без вращения образца. Во всех случаях угловой диапазон по 2θ составлял 10–140°, шаг сканирования на скоростных съемках – 0,8°, а время экспозиции – 1 с; шаг сканирования на съемках в асимметричной геометрии (для установления фазового состава покрытия с минимальным вкладом подложки) – 0,4°, а время экспозиции – 40 с. При съемках в асимметричной геометрии угол падения первичного луча составлял 3°. Идентификация фазового состава, качественный и количественный фазовый анализ, а также уточнение параметров структуры выполнены при помощи программного комплекса «КДА – Кристаллография и дифракционный анализ» со встроенной картотекой порошковых стандартов (АО ИЦ «Буревестник», версия 2023-01-24-144022.8dec10c0f). При расшифровке в первую очередь проверяли фазы TiB₂ и Ag. Только убедившись в их наличии или отсутствии, осуществлялся поиск других фаз.

2. Результаты и обсуждение

2.1. Результаты испытаний на электропроводность

Электропроводность сформированных электровзрывным методом покрытий системы TiB₂–Ag после электронно-пучковой обработки составляет 62,1 МСм/м. Полученное высокое значение электропроводности обеспечено применением серебра, упрочненного тугоплавкой

фазой диборида титана, обладающего высокой электропроводностью и в то же время твердостью, износостойкостью и электроэрозионной стойкостью. Также высокому значению электропроводности способствовала электронно-пучковая обработка, которая позволила получить гладкую поверхность покрытия без применения механических средств для достижения определенного класса шероховатости поверхности.

2.2. Результаты испытаний на электроэрозионную стойкость в условиях дуговой эрозии

Испытания сформированных покрытий на электроэрозионную стойкость продемонстрировали значения 7000 циклов коммутаций (включения и отключения) и низкое электрическое сопротивление, изменяющиеся в пределах $R = 10,11\text{--}11,73$ мкОм. Такие высокие значения достигнуты впервые при формировании электровзрывных электроэрозионностойких покрытий. Приведем описание процесса испытаний на электроэрозионную стойкость.

Сопротивление электрических контактов в момент начала испытаний составляет 10,17 мкОм для фазы R1, 10,11 мкОм для фазы R2 и 10,15 мкОм для фазы R3. Стоит отметить, что представленные значения являются минимальными. С ростом числа циклов включений/отключений до 2000 рассматриваемый параметр монотонно возрастает до 10,21; 10,17 и 10,19 мкОм для фаз R1, R2 и R3 соответственно. Дальнейшее увеличение числа циклов включений/отключений до 3000 способствует небольшому снижению сопротивления до 10,19; 10,21 и 10,23 мкОм для фаз R1, R2 и R3 соответственно. К 5000 циклов включений/отключений рассматриваемый параметр достигает своих максимумов 10,54; 10,57 и 10,51 мкОм соответственно. Затем при 6000 циклов включений/отключений сопротивление R1, R2 и R3 снизилось до 10,42; 10,5 и 10,47 мкОм. На момент окончания испытаний при 7000 циклов включений/отключений сопротивление на фазах R1, R2 и R3 имеет следующие значения: 10,73; 10,69 и 10,7 мкОм.

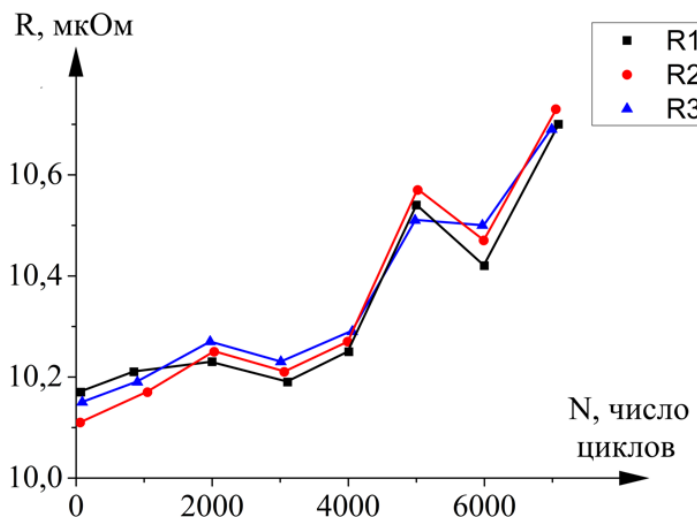


Рис. 3. График испытания электровзрывного покрытия системы $\text{TiB}_2\text{-Ag}$ после электронно-пучковой обработки на электроэрозионную стойкость в условиях дуговой эрозии. R – электрическое сопротивление, регистрируемое в процессе испытаний, N – число циклов коммутаций (включения и отключения), R1, R2 и R3 – электрическое сопротивление, регистрируемое в процессе испытаний на фазных контактных парах L1, L2 и L3

Fig. 3. Test schedule for the electro-explosive coating of the $\text{TiB}_2\text{-Ag}$ system after electron beam treatment for electrical erosion resistance under arc erosion conditions. R – electrical resistance recorded during testing, N – number of switching cycles (on and off), R1, R2 and R3 – electrical resistance recorded during testing on phase contact pairs L1, L2 and L3

2.3. Результаты испытаний на микротвердость

Микротвердость зависит от того, попадает ли индентор в серебряную матрицу или включения боридных фаз. В серебряной матрице значение микротвердости по Виккерсу изменяется в пределах 0,251–0,265 ГПа. В местах включений значение микротвердости по Виккерсу изменяется в пределах 25–32 ГПа.

2.4. Результаты испытаний на нанотвердость и модуль Юнга

После электровзрывного напыления покрытий системы $\text{TiB}_2\text{--Ag}$ значение нанотвердости составляет $H = 6,08 \pm 0,64$ ГПа, а модуля Юнга $E = 164 \pm 10$ ГПа. Рис. 4 демонстрирует характерную зависимость процесса испытаний на нанотвердость и модуль Юнга.

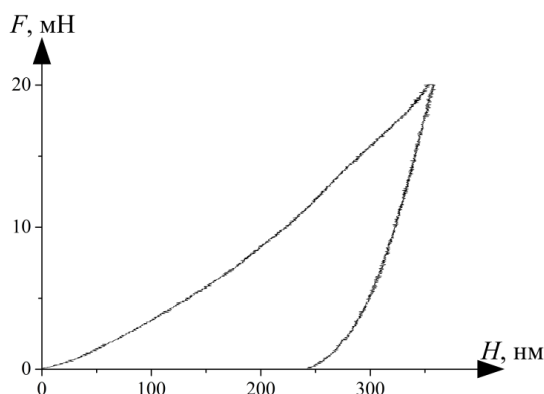


Рис. 4. Зависимость приложенной силы (F) от глубины погружения индентора (H) при испытаниях электровзрывного покрытия системы $\text{TiB}_2\text{--Ag}$, подвергнутому электронно-пучковой обработке, на нанотвердость и модуль Юнга

Fig. 4. Dependence of the applied force (F) on the indenter immersion depth (H) when testing the electroexplosive coating of the $\text{TiB}_2\text{--Ag}$ system subjected to electron beam processing for nanohardness and Young's modulus

2.5. Результаты испытаний на износостойкость и коэффициент трения

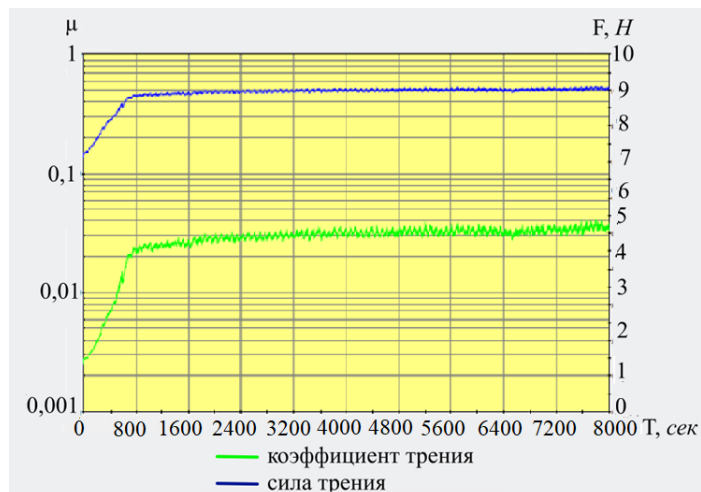


Рис. 5. Зависимости коэффициента трения (зеленая кривая) и силы трения (синяя кривая) от времени испытаний для покрытия системы $\text{TiB}_2\text{--Ag}$

Fig. 5. Dependence of the coefficient of friction (green curve) and friction force (blue curve) on test time for the coating of the $\text{TiB}_2\text{--Ag}$ system

Установлено, что параметр износа (величина, обратная износостойкости) образца с электровзрывным покрытием системы $\text{TiB}_2\text{--Ag}$, подвергнутому электронно-пучковой обработке, составил $3,6 \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$. В ранее проведенных исследованиях [32] показано, что параметр износа медной мишени-подложки составил $9,6 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$. Полученное покрытие обладает наименьшим параметром износа среди покрытий различных систем, полученных методами электровзрывного напыления, электронно-пучковой обработки и азотирования и описанных в [32] к настоящему времени. Коэффициент трения образцов (рис. 5) с покрытием составил 0,47, а медной подложки – 0,67, согласно данным [32]. Полученное покрытие обладает наименьшим коэффициентом трения среди покрытий различных систем, полученных методами электровзрывного напыления, электронно-пучковой обработки и азотирования и описанных в [32] к настоящему времени. То есть сформированное электровзрывное покрытие системы $\text{TiB}_2\text{--Ag}$, подвергнутое электронно-пучковой обработке, обладает наименьшими значениями параметра износа и коэффициента трения среди покрытий, полученных ранее аналогичными методами.

2.6. Микроструктура покрытий

С одной стороны, диборид титана TiB_2 обладает хорошей термической стабильностью и электропроводностью. Однако электропроводность диборида титана меньше электропроводности серебра. Поэтому добавление TiB_2 будет препятствовать непрерывности матричного интерфейса и увеличивать эффект рассеяния свободных электронов, тем самым уменьшая проводимость материала. С другой стороны, TiB_2 препятствует росту зерен материала в процессе формирования покрытия, измельчает зерна и действует как частица вторичной фазы, создавая препятствия движению дислокаций, что имеет положительное влияние на твердость.

Для того чтобы изучить полученное состояние структуры для композиционного покрытия после электровзрывного напыления и электронно-пучковой обработки, использовали рентгеноструктурный анализ (рис. 6 и таблица).

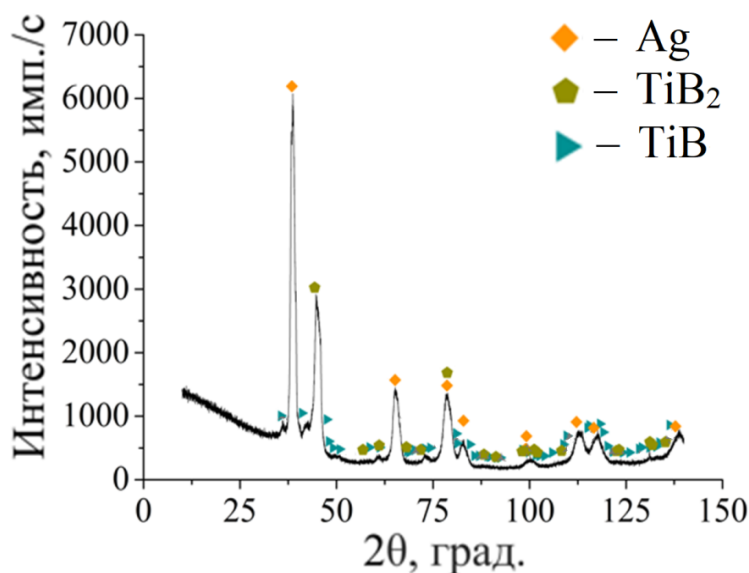


Рис. 6. Участок рентгенограммы электровзрывного покрытия системы $\text{TiB}_2\text{--Ag}$, подвергнутого электронно-пучковой обработке

Fig. 6. Section of the X-ray diffraction pattern of the electro-explosive coating of the $\text{TiB}_2\text{--Ag}$ system subjected to electron beam processing

Результат исследования фазового состава и структурных параметров электровзрывного покрытия системы $\text{TiB}_2\text{--Ag}$, подвергнутого электронно-пучковой обработке

Result of the study of the phase composition and structural parameters of the electro-explosive coating of the $\text{TiB}_2\text{--Ag}$ system subjected to electron beam processing

Фаза	Доля фазы, мас. %	Параметры решетки, Å	Размеры ОКР, нм
Ag	56	$a = 4,0324$	13
TiB_2	41	$a = 3,0342$ $c = 3,2272$	15
TiB	3	$a = 6,1221$ $b = 3,0746$ $c = 4,5616$	32

Посредством рентгеноструктурного анализа установлено, что фазовый состав сформированного покрытия представлен фазами серебра, диборида титана TiB_2 и моноборида титана TiB. В случае фазы серебра происходит искажение параметра кристаллической решетки a до значения $4,0324 \text{ Å}$ в сравнении с табличным значением $4,086 \text{ Å}$. Аналогично для фазы диборида титана происходит искажение параметров кристаллической решетки до значений $a = 3,0342 \text{ Å}$, $c = 3,2272$ в сравнении с табличными значениями $a = 3,0236 \text{ Å}$, $c = 3,2204 \text{ Å}$. В результате комплексного воздействия при формировании покрытия при электровзрывном напылении и электронно-пучковой обработке также происходит формирование фазы моноборида титана с параметрами кристаллической решетки, составляющими значения $a = 6,1221 \text{ Å}$, $b = 3,0746 \text{ Å}$ и $c = 4,5616 \text{ Å}$. Формирование фазы моноборида титана, вероятно, происходит при частичном оплавлении фазы диборида титана и трансфере бора. Данные искажения параметров кристаллических решеток всех фаз покрытия связаны с неравновесными условиями его получения. Электронно-пучковая обработка в данном случае сопровождается не только диспергированием структуры для создания нанокристаллического состояния с целью получения лучших свойств по сравнению с аналогичным покрытием без электронно-пучковой обработки, но и фазовым превращением с образованием новой фазы моноборида титана.

Методом сканирующей электронной микроскопии установлено, что покрытие имеет весьма однородный рельеф (рис. 7), толщина покрытия составляет 100 мкм . Электронно-пучковая обработка приводит к растеканию неровностей поверхностного рельефа и обеспечению однородности толщины покрытия.

Как и следовало ожидать, данные включения являются диборидом титана, что было убедительно показано методами микрорентгеноспектрального анализа (метод картирования), результаты которого приведены на рис. 8. Часто включения диборида титана в системе «покрытие ($\text{TiB}_2\text{--Ag}$)/ (медь) подложка» наблюдаются в виде скоплений разнообразной формы и размеров (рис. 9). Размер включений диборида титана изменяется в пределах $1\text{--}20 \text{ мкм}$. В совокупности это указывает на формирование в покрытии механической смеси двух фаз – серебра и диборида титана. Однозначно говорить о формировании и идентификации фазы моноборида титана при анализе изображений на прямых шлифах (рис 8, 9) не представляется возможным. Это может быть обусловлено двумя причинами. Первая причина состоит в том, что наличие на изображении, полученном с прямого шлифа, фазы моноборида титана затруднительно из-за того, что содержание фазы моноборида титана (согласно данным рентгеноструктурного анализа, рис. 6) составляет $3 \text{ мас. \%}$. Попадание фазы на фото шлифа носит вероятностный характер и при содержании моноборида титана во всем объеме покрытия $3 \text{ мас. \%}$ это становится затруднительным. Второй причиной является то, что на ЭДС карте распределение бора всегда имеет большую ошибку, которая может доходить до 99% . Поэтому однозначно говорить о формировании фазы моноборида титана, основываясь на наборе характеристического излучения бора, в данном случае не является корректным.

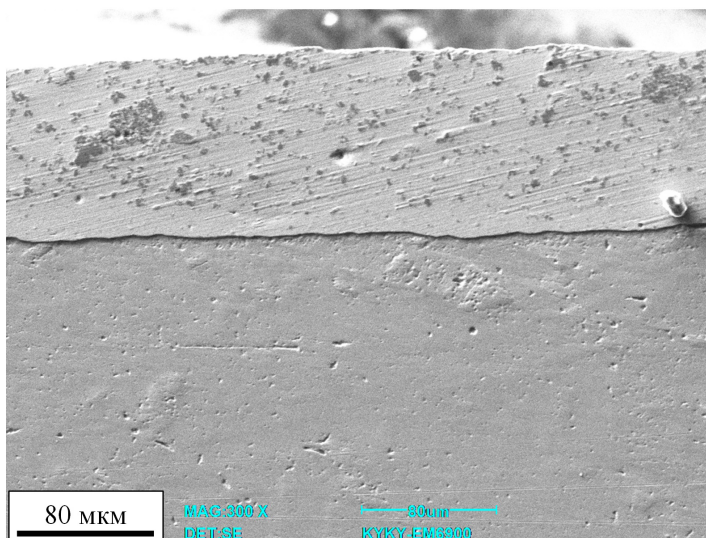


Рис. 7. Структура электровзрывного покрытия системы $\text{TiB}_2\text{-Ag}$ после электронно-пучковой обработки, выявленная методом сканирующей электронной микроскопии на поперечном шлифе

Fig. 7. Structure of the electroexplosive coating of the $\text{TiB}_2\text{-Ag}$ system after electron beam treatment, revealed by scanning electron microscopy on a transverse section

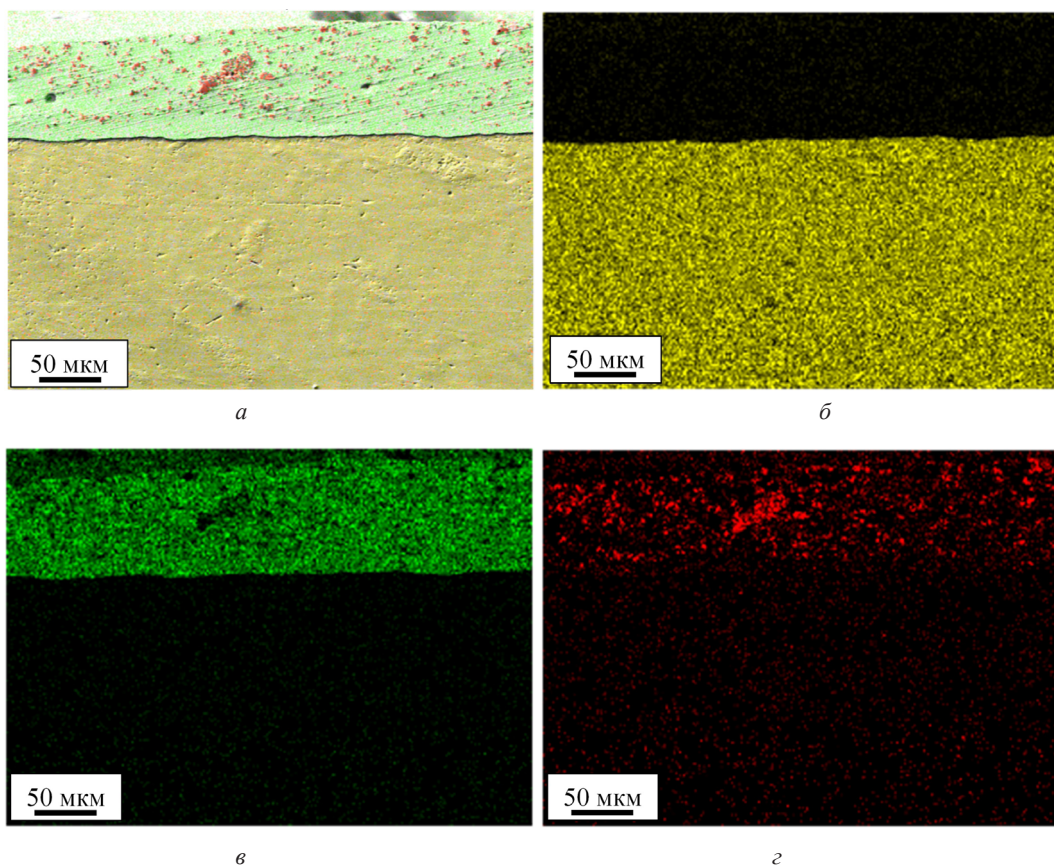


Рис. 8. Изображения структуры системы «покрытие ($\text{TiB}_2\text{-Ag}$)/(медь) подложка» после электронно-пучковой обработки, полученные в характеристическом рентгеновском излучении атомов меди (δ), серебра (ϵ) и титана (ζ); a – многослойная карта ЭДС, полученная наложением изображений ($\delta\text{-}\zeta$)

Fig. 8. Images of the structure of the “coating ($\text{TiB}_2\text{-Ag}$)/(copper) substrate” system after electron beam processing, obtained in the characteristic X-ray radiation of copper (δ), silver (ϵ) and titanium (ζ) atoms; a – multilayer EMF map obtained by overlaying images ($\delta\text{-}\zeta$)

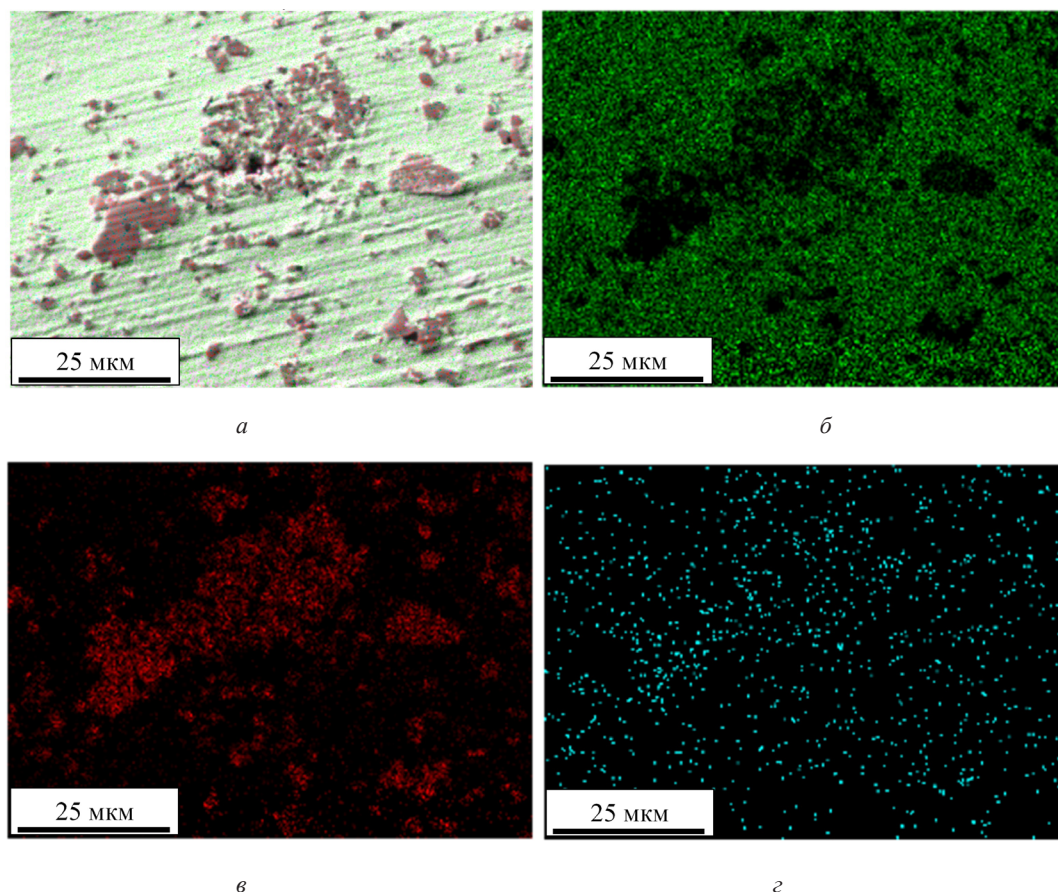


Рис. 9. Изображения структуры системы «покрытие ($\text{TiB}_2\text{-Ag}$)/ (медь) подложка» после электронно-пучковой обработки, *а* – многослойная карта ЭДС, *б-г* – изображения, полученные в характеристических рентгеновских излучениях атомов серебра, титана и бора соответственно
 Fig. 9. Images of the structure of the “coating ($\text{TiB}_2\text{-Ag}$)/ (copper) substrate” system after electron beam processing, *a* – multilayer EMF map, *б-г* – images obtained in the characteristic X-ray radiation of silver, titanium and boron atoms, respectively

Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии установлено, что в поверхностном слое есть твердый раствор меди в серебре (основная решетка – серебро ГЦК). На дифракциях видны тяжи, предположительно связанные с двойникованием (тонкие пластинки двойников) в серебре. Также медь присутствует в виде шарообразных (либо ограниченных, либо вытянутых ламелями) зерен – другая решетка ГЦК – размеры субмикрористаллические (рис. 10). Помимо этого, надежно зафиксирован диборид титана TiB_2 . Данный борид представляет собой недеформированные зерна и частицы. Контуры в них очень тонкие (белые зерна, обведенные красным кружком) на рис. 11. Судя по рентгеноструктурному анализу, помимо фазы диборида титана, также присутствует фаза моноборида титана TiB . Кроме того, есть множество дисперсных частиц, представленных другими боридами титана. Формирование структуры, основанной на сочетании атомов серебра, титана и бора, также подтверждается данными рис. 12.

В целом, проведенный комплексный анализ структуры методами рентгенофазового анализа, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии с применением методик микрорентгеноспектрального анализа, расшифровки микроэлектроннограмм и анализа светлорольных и темнорольных изображений, позволяет утверждать, что размер структурных составляющих исследованного покрытия изменяется от микрористаллических к субмикрористаллическим.

сталлическим и нанокристаллическим. Фазовый состав образован преимущественно серебром и диборидом титана. Моноборид титана содержится в количестве, не превышающем 3 мас. %. Кроме того, в меньшем количестве присутствуют и другие бориды титана.

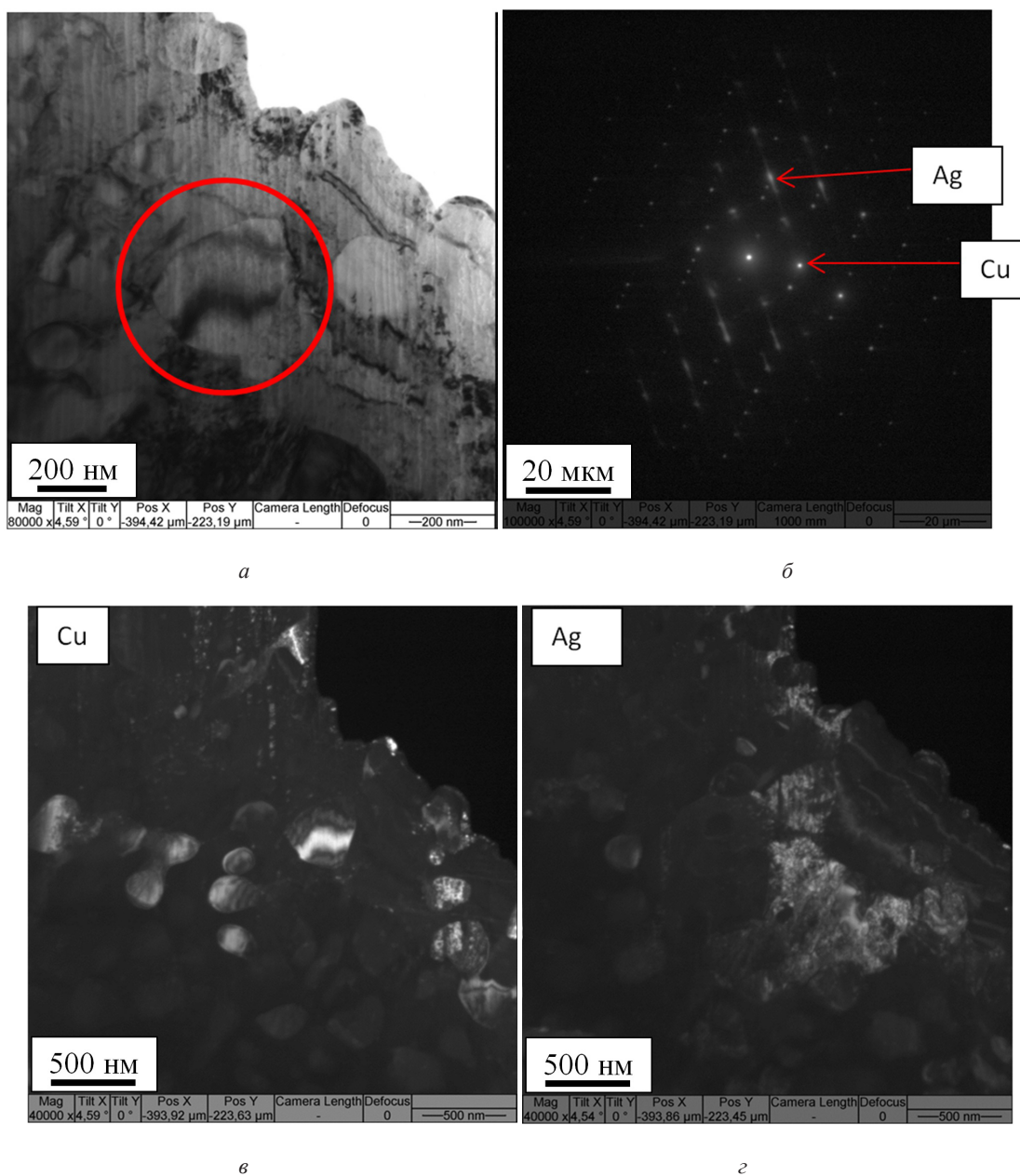
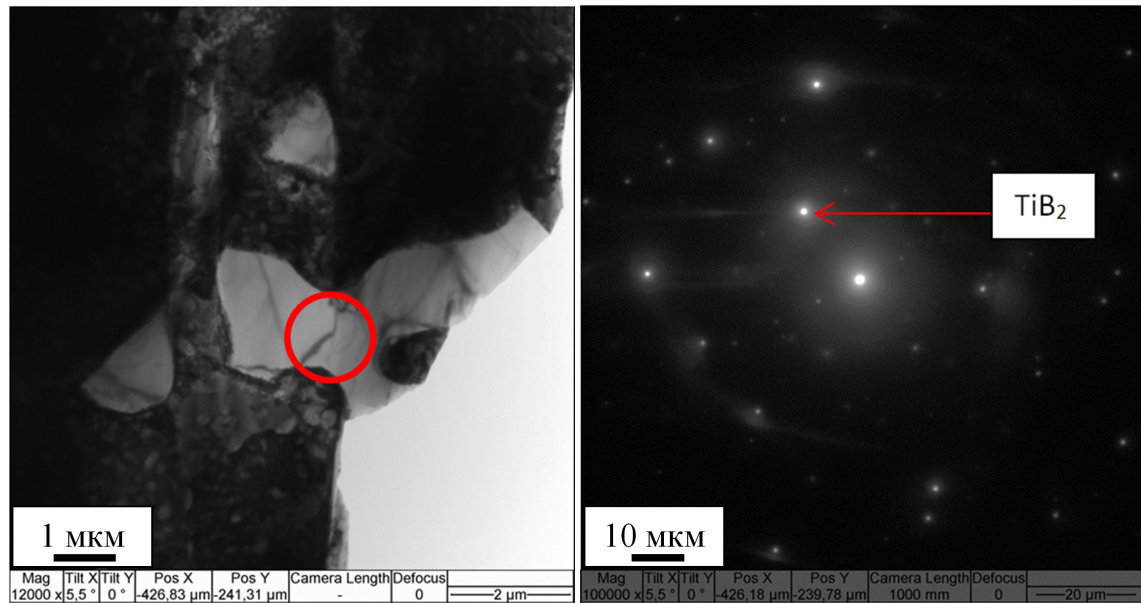


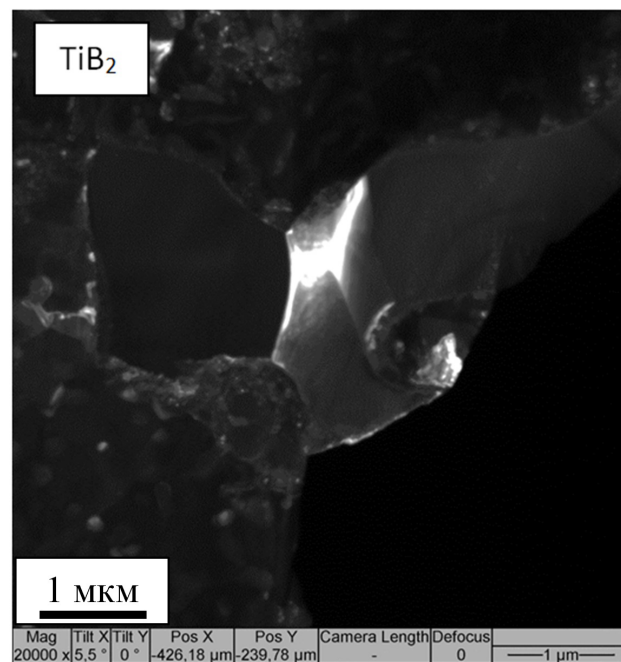
Рис. 10. ПЭМ-изображение структуры системы «покрытие ($\text{TiB}_2\text{-Ag}$)/(медь) подложка» после электронно-пучковой обработки; а – светлопольное изображение; б – микроэлектронграмма; в, г – темнопольные изображения, полученные в рефлексах Cu и Ag

Fig. 10. TEM image of the structure of the “coating ($\text{TiB}_2\text{-Ag}$)/(copper) substrate” system after electron beam processing; а – bright-field image; б – microelectronogram; в, г – dark-field images obtained in Cu and Ag reflections



a

b



c

Рис. 11. ПЭМ-изображение структуры системы «покрытие (TiB₂-Ag)/(медь) подложка» после электронно-пучковой обработки; а – светлостовное изображение; б – микроэлектроннограмма; в – темнопольное изображение, полученное в рефлексе TiB₂

Fig. 11. TEM image of the structure of the “coating (TiB₂-Ag)/(copper) substrate” system after electron beam processing; а – bright-field image; б – microelectronogram; в – dark-field image obtained in the TiB₂ reflection

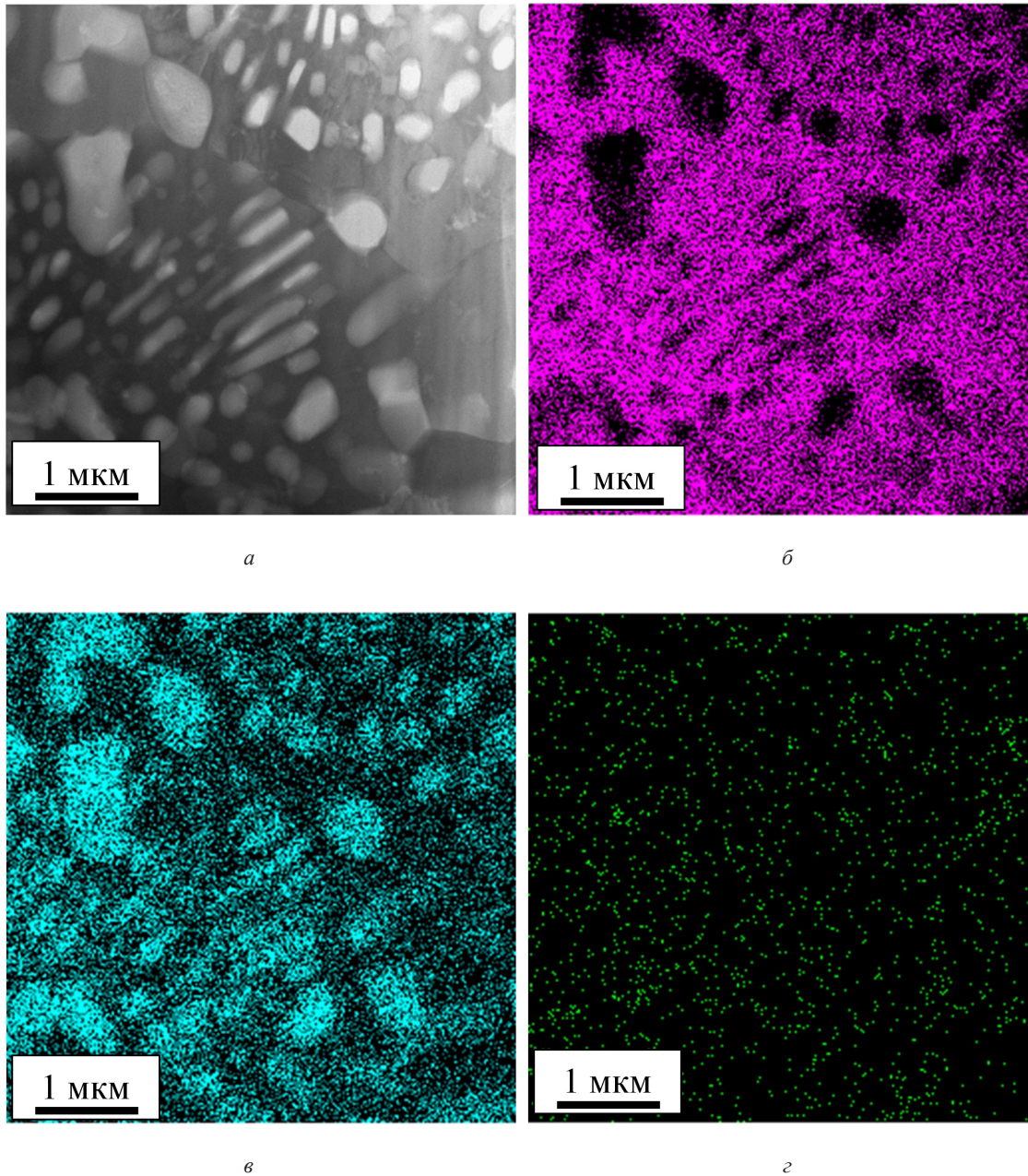


Рис. 12. ПЭМ-изображения структуры системы «покрытие ($\text{TiB}_2\text{-Ag}$)/(медь) подложка» после электронно-пучковой обработки; б – з – изображения участка фольги (а), полученные в характеристическом рентгеновском излучении атомов серебра (б), титана (в) и бора (з).

Изображение (а) получено в STEM режиме работы электронного микроскопа, з – в TEM-режиме работы электронного микроскопа

Fig. 12. TEM images of the structure of the “coating ($\text{TiB}_2\text{-Ag}$)/(copper) substrate” system after electron beam processing; б – з – images of a section of foil (а), obtained in the characteristic X-ray radiation of silver (б), titanium (в) and boron (з) atoms. Image (а) was obtained in the STEM operating mode of the electron microscope, з – in the TEM operating mode of the electron microscope

Заключение

В результате применения двухстадийного метода формирования покрытий, включающего электровзрывное напыление и электронно-пучковую обработку, на медной поверхности впер-

вые получены покрытия, преимущественно образованные серебром и диборидом титана. Толщина покрытий составляет 100 мкм. Покрытия образованы серебряной матрицей с расположенными в ней включениями боридов титана с размерами трех типов: нанокристаллический, субмикрокристаллический и микрокристаллический. Содержание серебра в покрытии составляет, 56 мас. %, диборида титана TiB_2 – 41 мас. %, а на оставшиеся 3 мас. % приходятся прочие бориды титана с преимущественным формированием моноборида титана TiB. Все параметры кристаллической решетки всех формирующихся фаз покрытия искажены относительно табличных значений, что вызвано неравновесным процессом формирования покрытия. Электропроводность покрытия составляет 62,1 МСм/м и выдерживает 7000 циклов коммутаций (включения и отключения) в условиях ускоренных испытаний на электроэрозионную стойкость, при этом электрическое сопротивление изменяется в пределах $R = 10,11\text{--}11,73$ мкОм. Микротвердость по Виккерсу серебряной матрицы составляет 0,251–0,265 ГПа, а включений боридов титана – 25–32 ГПа. Значение нанотвердости составляет $H = 6,08 \pm 0,64$ ГПа, а модуля Юнга $E = 164 \pm 10$ ГПа. Параметр износа покрытия в условиях сухого трения-скольжения составляет 3,6 мм³/Н·м, а коэффициент трения – 0,47. Полученное покрытие превосходит все исследуемые свойства в сравнении с ранее изученными электровзрывными покрытиями различных систем.

Список литературы / References

1. **Slade P. G.** Electrical Contacts: Principles and Applications, Boca Raton, CRC press, 2014, 1268 p.
2. **Braunovic M., Myshkin N. K., Konchits V. V.** Electrical Contacts: Fundamentals, Applications and Technology, Boca Raton, CRC press, 2017, 672 p.
3. **Kesim M. T., Yu H., Sun Y., Aindow M., Alpay S. P.** Corrosion, oxidation, erosion and performance of Ag/W-based circuit breaker contacts: A review // Corrosion Science. 2018. Vol. 135. P. 12–34.
4. **Zhang H., Wang X. H., Li Y. P., Guo C. S., Zhang C. M.** Preparation and characterization of silver-doped graphene-reinforced silver matrix bulk composite as a novel electrical contact material // Appl. Phys. A. 2019. Vol. 125. No. 2. P. 1–9.
5. **Pons F., Cherkaoui M., Ilali I., Dominiak S.** Evolution of the AgCdO contact material surface microstructure with the number of arcs // J. Electron. Mater. 2010. Vol. 39. No. 4. P. 456–463.
6. **Teixeira F. D. S. M., de Carvalho Peres A. C., Gomes T. S., Visconte L. L. Y., Pacheco E. B. A. V.** A Review on the Applicability of Life Cycle Assessment to evaluate the technical and environmental properties of waste electrical and electronic equipment // Journal of Polymers and the Environment. 2021. Vol. 29. P. 1333–1349.
7. **Cosovic V., Cosovic A., Talijan N., Zivkovic D., Zivkovic Z.** State of the art and challenges in development of electrical contact materials in the light of the RoHS directive // Sci. Sinter. 2012. Vol. 44. No. 2. P. 245–253.
8. **Wang J., Liu W., Li D. M., Wang Y. P.** The behavior and effect of CuO in Ag/SnO₂ materials // J. Alloys Compd. 2014. Vol. 588. P. 378–383.
9. **Wei Z. J., Zhang L. J., Shen T., Qiao Z., Yang H., Fan X.** Effects of oxide-modified spherical ZnO on electrical properties of Ag/ZnO electrical contact material // J. Mater. Eng. Perform. 2016. Vol. 25. No. 9. P. 3662–3671.
10. **Zhou X. L., Cao J. C., Li J. T., Chen J. C., Peng Y. Y., Zhang K. H.** Effect of severe plastic deformation on microstructures and properties of AgCuO composites // Adv. Mater. Res. 2010. Vol. 177. P. 49–53.
11. **Sleziona J., Wiczorek J., Dyzia M.** Mechanical properties of silver matrix composites reinforced with ceramic particles // J. Achiev. Mater. Manuf. Eng. 2006. Vol. 17. No. 1–2. P. 165–168.

12. **Biyik S., Arslan F., Aydin M.** Arc-erosion behavior of boric oxide-reinforced silverbased electrical contact materials produced by mechanical alloying // *J. Electron. Mater.* 2015. Vol. 44. No. 1. P. 457–466.
13. **Slade P., Kossowsky R., Aspden R., Bratton R.** The use of ceramic matrices infiltrated with silver for electric contact applications // *IEEE Trans. Parts, Hybrids.* 1974. Vol. 10. No. 1. P. 37–42.
14. **Wang X., Li G., Zou J., Liang S., Fan Z.** Investigation on preparation, microstructure, and properties of AgTiB_2 composite // *J. Compos. Mater.* 2011. Vol. 45. No. 12. P. 1285–1293.
15. **Barsoum M. W.** The $\text{MN}+1\text{AXN}$ phases: a new class of solids; Thermodynamically stable nanolaminates // *Prog. Solid State Chem.* 2000. Vol. 28. No. 1–4. P. 201–281.
16. **Sun Z. M.** Progress in research and development on MAX phases: a family of layered ternary compounds // *Int. Mater. Rev.* 2011. Vol. 56. No. 3. P. 143–166.
17. **Wang X. H., Zhou Y. C.** Layered machinable and electrically conductive Ti_2AlC and Ti_3AlC_2 ceramics: a review // *J. Mater. Sci. Technol.* 2010. Vol. 26. No. 5. P. 385–416.
18. **Huang X. C., Feng Y., Qian G., Zhang J. C., Zhang X. B.** Influence of breakdown voltages on arc erosion of a Ti_3AlC_2 cathode in an air atmosphere // *Ceram. Int.* 2017. Vol. 43. No. 13. P. 10601–10605.
19. **Liu M., Chen J., Cui H., Liu S., Sun X., Xie M.** Temperature-driven deintercalation and structure evolution of $\text{Ag/Ti}_3\text{AlC}_2$ composites // *Ceram. Int.* 2018. Vol. 44. No. 15. P. 18129–18134.
20. **Ding J. X., Tian W. B., Wang D. D., Chen J., Yang Y., Sun Z. M.** Corrosion and degradation mechanism of $\text{Ag/Ti}_3\text{AlC}_2$ composites under dynamic electric arc discharging // *Corrosion Sci.* 2019. Vol. 156. P. 147–160.
21. **Zhang M., Tian B. W., Zhang P. G., Ding J. X., Zhang Y. M., Sun Z. M.** Microstructure and properties of $\text{Ag-Ti}_3\text{SiC}_2$ contact materials prepared by pressureless sintering // *Int. J. Miner. Metall. Mater.* 2018. Vol. 25. No. 7. P. 810–816.
22. **Wang D. D., Tian W. B., Lu C. J., Ding J. X., Zhu Y. F., Zhang M., Zhang P. G., Sun Z. M.** Comparison of the interfacial reactions and properties between $\text{Ag/Ti}_3\text{AlC}_2$ and $\text{Ag/Ti}_3\text{SiC}_2$ electrical contact materials // *J. Alloys Compd.* 2020. Vol. 857. P. 157588.
23. **Huang X., Feng Y., Ge J., Li L., Li Z., Ding M.** Arc erosion mechanism of $\text{Ag-Ti}_3\text{SiC}_2$ material // *J. Alloys Compd.* 2020. Vol. 817. P. 152741.
24. **Ding J. X., Tian W. B., Wang D. D., Zhang P. G., Chen J., Sun Z. M.** Arc Erosion and degradation mechanism of $\text{Ag/Ti}_2\text{AlC}$ composite // *Acta Metall. Sin.* 2019. Vol. 55. No. 5. P. 627–637.
25. **Ding J. X., Huang P. Y., Zha Y. H., Wang D., Zhang P. G., Tian W. B., Sun Z. M.** Highpurity Ti_2AlC powder: preparation and application in Ag-based electrical contact materials // *J. Inorg. Mater.* 2020. Vol. 35. No. 6. P. 729–734.
26. **Ding J. X., Tian W. B., Zhang P. G., Zhang M., Chen J., Zhang Y., Sun Z. M.** Preparation and arc erosion properties of $\text{Ag/Ti}_2\text{SnC}$ composites under electric arc discharging // *Journal of Advanced Ceramics.* 2019. Vol. 8. No. 1. P. 90–101.
27. **Ding J. X., Tian W. B., Wang D. D., Zhang P. G., Chen J., Zhang Y., Sun Z. M.** Microstructure evolution, oxidation behavior and corrosion mechanism of $\text{Ag/Ti}_2\text{SnC}$ composite during dynamic electric arc discharging // *J. Alloys Compd.* 2019. Vol. 785. No. 1. P. 1086–1096.
28. **Romanov D. A., Moskovskii S. V., Gromov V. E.** Surface Structure Modification and Hardening of Al-Si Alloys, Boca Raton, CRC press, 2020, 266 p.

Сведения об авторах

Почетуха Василий Витальевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Романов Денис Анатольевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник

Вашук Екатерина Степановна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Филяков Артем Дмитриевич, младший научный сотрудник

Громов Виктор Евгеньевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник

Information about the Authors

Vasily V. Pochetukha, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher

Denis A. Romanov, Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher

Ekaterina S. Vashchuk, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher

Artem D. Filyakov, Without an Academic Degree, Junior Researcher

Denis A. Romanov, Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher

*Статья поступила в редакцию 14.10.2023; одобрена после рецензирования 05.12.2023;
принята к публикации 05.03.2024*

*The article was submitted 14.10.2023; approved after reviewing 05.12.2023;
accepted for publication 05.03.2024*

«Сибирский физический журнал» публикует обзорные, оригинальные и дискуссионные статьи, посвященные научным исследованиям и методике преподавания физики в различных разделах науки, соответствующих направлениям подготовки на кафедрах физического факультета НГУ. Журнал издается на русском языке, однако возможна публикация статей иностранных авторов на английском языке.

1. Очередность публикации статей определяется их готовностью к печати. Рукописи, оформленные без соблюдения правил, к рассмотрению не принимаются.

Вне очереди печатаются краткие сообщения (не более четырех журнальных страниц), требующие срочной публикации и содержащие принципиально новые результаты научных исследований, проводимых в рамках тематики журнала.

Рекламные материалы публикуются при наличии гарантии оплаты, устанавливаемой по соглашению сторон.

2. В журнале печатаются результаты, ранее не опубликованные и не предназначенные к одновременной публикации в других изданиях. Публикация не должна нарушить авторского права других лиц или организаций.

Направляя свою рукопись в редакцию, авторы автоматически передают учредителям и редколлегии права на издание данной статьи на русском или английском языке и на ее распространение в России и за рубежом. При этом за авторами сохраняются все права как собственников данной рукописи. В частности, согласно международным соглашениям о передаче авторских прав за авторами остается право копировать опубликованную статью или ее часть для их собственного использования и распространения внутри учреждений, сотрудниками которых они являются. Копии, сделанные с соблюдением этих условий, должны сохранять знак авторского права, который появился в оригинальной опубликованной работе. Кроме того, авторы имеют право повторно использовать весь этот материал целиком или частично в компиляциях своих собственных работ или в учебниках, авторами которых они являются. В этих случаях достаточно включить полную ссылку на первоначально опубликованную статью.

3. Направлять рукописи в редакцию авторам рекомендуется по электронной почте либо приносить в редакцию электронную версию (в форматах MS WORD – *.doc, или *.docx, или *.rtf) на диске или флэш-памяти. Такая отправка исходных материалов значительно ускоряет процесс рецензирования.

Авторам предлагается посылать свои сообщения в наиболее сжатой форме, совместимой с ясностью изложения, в совершенно обработанном и окончательном виде, предпочтительно без формул и выкладок промежуточного характера и громоздких математических выражений. Не следует повторять в подписях к рисункам пояснений, уже содержащихся в тексте рукописи, а также представлять одни и те же результаты и в виде таблиц, и в виде графиков.

Рекомендованный объем присылаемых материалов: обзорные статьи – до 25-ти страниц, оригинальные материалы – до 12-ти страниц, краткие сообщения – до 4-х страниц. В любом случае объем рукописи должен быть логически оправданным.

Не рекомендуется предоставление электронных копий рукописей в формате LATEX. По техническим условиям издательства в этом случае рукопись будет преобразована редакцией в формат MS WORD, что может привести к значительному увеличению времени обработки рукописи и искажениям авторского текста.

Сокращений слов, кроме стандартных, применять нельзя. Все страницы рукописи должны быть пронумерованы.

4. При отправке файлов по электронной почте просим придерживаться следующих правил:

- указывать в поле subject (тема) название, номер журнала и фамилию автора;
- использовать attach (присоединение);

- в случае больших объемов информации возможно использование общеизвестных архиваторов (ARJ, ZIP, RAR);
- в состав электронной версии рукописи должны входить:
- файл, содержащий текст рукописи со вставленными в него рисунками;
- отдельные файлы с рисунками высокого качества;
- файл со сведениями об авторах (полностью фамилия, имя, отчество, ученые степень и звание, место работы, служебный адрес и телефон, адрес электронной почты для оперативной связи);
- файл с переводом на английский язык следующей информации: ФИО авторов, аффилиация, адрес, название статьи, аннотация, ключевые слова, подрисуночные подписи, названия таблиц.

Авторы вставляют рисунки и таблицы в текст рукописи так, как считают нужным. Рукопись обязательно должна быть подписана автором, а при наличии нескольких авторов – всеми соавторами.

Редакция обращает внимание авторов на возможность и целесообразность использования цветного графического материала.

5. В начале рукописи должны быть указаны индекс УДК, название статьи, ФИО авторов (полностью), название и почтовый адрес учреждений, в которых выполнена работа, аннотация, содержащая основные результаты и выводы работы (в английском варианте не менее 1 000 знаков, русский вариант должен соответствовать английскому), ключевые слова, сведения о финансовой поддержке работы.

Например:

УДК 29.19.37; 47.03.08

Оценка конвективного массопереноса

Иван Иванович Иванов

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича

Сибирского отделения Российской академии наук

Новосибирск, Россия

ivan@academ.org, <https://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx>

Аннотация

Ключевые слова

Благодарности

Evaluation of Convective Mass Transfer

Ivan I. Ivanov

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics

of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Novosibirsk, Russian Federation

ivan@academ.org, <https://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx>

Abstract

Keywords

Acknowledgements

Основной текст статьи

Список литературы / References (в порядке цитирования)**Сведения об авторе / Information about the Author**

Иванов Иван Иванович, доктор физико-математических наук, профессор
Ivan I. Ivanov, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor
WoS Researcher ID
Scopus Author ID
SPIN

Подпись автора (авторов)

6. Параметры страницы: формат – А4; ориентация – книжная; поля (см): слева – 2,5; справа – 1; сверху – 2,5; снизу – 2,3; от края до нижнего колонтитула – 1,3.

7. Основной текст: стиль – «Обычный»: гарнитура (шрифт) Times New Roman (Cyr), кегль (размер) 12 пунктов, абзацный отступ – 0,5 см, через 1,5 интервала, выравнивание – по ширине.

В тексте рукописи следует избегать аббревиатур, даже таких общепринятых, как ЭДС, ВТСП и т. п. Использование аббревиатур и простых химических формул в заголовках рукописей совершенно недопустимо. Следует писать: высокотемпературная сверхпроводимость, кремний, арсенид галлия и т. п., давая при необходимости соответствующую аббревиатуру или химическую формулу в тексте. Исключение могут составлять формулы сложных химических соединений. Каждое первое употребление аббревиатуры в тексте должно быть четко пояснено.

Не следует:

- производить табуляцию;
- разделять абзацы пустой строкой;
- использовать макросы, сохранять текст в виде шаблона и с установкой «только для чтения»;
- распределять текст по двум или более столбцам;
- расставлять принудительные переносы.

8. Таблицы должны иметь заголовки (на русском и английском языках). В таблицах обязательно указываются единицы измерения величин.

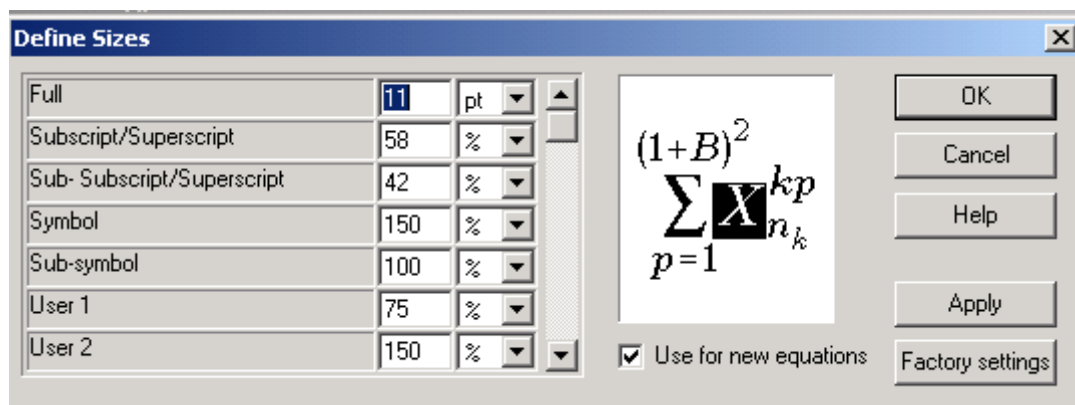
9. Число рисунков должно быть логически оправданным, качество – высоким. Файлы изображений должны находиться в том же каталоге, что и основной документ, и иметь имена, соответствующие номерам рисунков в рукописи (например, 09.tif или 22a.jpg).

10. Подписи к рисункам (на русском и английском языках) в электронной версии рукописи выполняются под рисунками, точка в конце не ставится. Если имеется несколько рисунков, объединенных одной подписью, они обозначаются русскими строчными буквами: а, б, в...

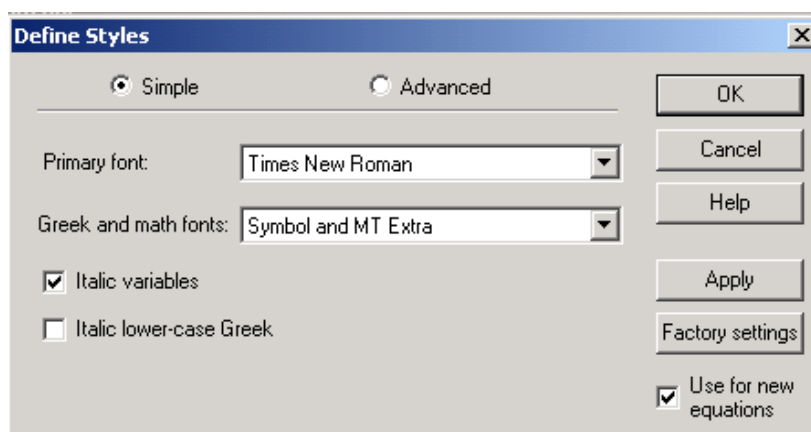
11. Формулы набираются в редакторе формул Microsoft Equation MathType в подбор к тексту или отдельной строкой по центру, **кегль 11 пт**.

Нумерация формул сквозная, в круглых скобках, прижатых к правому полю. Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в тексте.

Настройки редактора формул



a



б

12. Библиографические ссылки. В тексте в квадратных скобках арабскими цифрами указывается порядковый номер научного труда в библиографическом списке, например: [2; 3], [4–6] и т. д. В конце рукописи помещается список литературы в порядке упоминания в рукописи. Ссылки на российские издания приводятся на русском языке и сопровождаются переводом на английский язык (в отдельной строке, но под тем же номером). Библиографическое описание публикации включает: фамилию и инициалы автора, полное название работы, а также издания, в котором опубликована (для статей), город, название издательства, год издания, том (для многотомных изданий), номер, выпуск (для периодических изданий), объем публикации (количество страниц – для монографии, первая и последняя страницы – для статьи).

Ссылки на интернет-источники, базы данных и т. п. ресурсы, не поддающиеся библиографическому описанию, оформляются в виде примечаний (сносок).

13. В конце рукописи авторы могут поместить список использованных обозначений и сокращений.

14. Возвращение рукописи на доработку не означает, что рукопись уже принята к печати. Доработанный вариант необходимо прислать в редакцию в электронном виде с соблюдением всех требований вместе с ее начальной версией, рецензией и ответом на замечания рецензента не позднее двух месяцев со дня его отсылки. В противном случае первоначальная дата поступления рукописи при публикации не указывается.

15. Решение редакционной коллегии о принятии рукописи к печати или ее отклонении сообщается авторам.

В случае приема рукописи к публикации авторы должны прислать или передать в редакцию два бумажных экземпляра рукописи. Материалы печатаются на принтере на одной стороне стандартного (формат А4) листа белой бумаги. При этом тексты рукописи в бумажной и электронной версиях должны быть идентичными.

16. К рукописи прилагаются письмо от учреждения, в котором выполнена работа, и экспертное заключение о возможности ее опубликования в открытой печати. Если коллектив авторов включает сотрудников различных учреждений, необходимо представить направления от всех учреждений.

Сообщения, основанные на работах, выполненных в учреждении (учреждениях), должны содержать точное название и адрес учреждения (учреждений), публикуемые в статье.

17. После подготовки рукописи к печати редакция отправляет авторам электронную версию статьи с просьбой срочно сообщить в редакцию электронной почтой о замеченных опечатках для внесения исправлений в печатный текст.

18. После выхода журнала статьи размещаются на сайте физического факультета НГУ, а также на сайте Научной электронной библиотеки (elibrary.ru).

Адрес редакции

Физический факультет, к. 140 главного корпуса НГУ
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090,
редакция «Сибирского физического журнала»

тел. +7 (383) 363 44 25
physics@vestnik.nsu.ru