

НОВЫЕ КАНАЛЫ ДЛЯ ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA И ДИНАМИКА ПУЧКОВ В НИХ

*Г. А. Филатов¹, А. Сливин, Е. М. Сыресин, А. В. Бутенко,
А. Ф. Чеснов, Т. Парфило, А. В. Тузиков*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В ОИЯИ в рамках проекта тяжелоионного коллайдера NICA ведется сооружение нового ускорительного комплекса, включающего в себя новые каналы для прикладных исследований. В программе прикладных исследований новые каналы перевода пучка являются связующим звеном между станциями для прикладных исследований и ускорителями комплекса NICA. Задачей каналов является транспортировка и формирование пучка с требуемыми параметрами. В работе обсуждаются трассы, отклоняющие магниты и результаты моделирования динамики пучка для каналов.

The new accelerator complex including new beam lines for applied research is constructed by the Joint Institute for Nuclear Research (Dubna) in the framework of the Nuclotron-based Ion Collider fAcility (NICA) project. New beam channels are the link between the NICA accelerators and new stations for applied research in the applied study program. The goal of the channels is the beam transport and the beam formation with required parameters. Floor plans, deflection dipole magnets, beam dynamics simulation results for the channels are discussed in this work.

PACS: 61.80.Jh; 41.85.-p

ВВЕДЕНИЕ

Проект NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) [1] — проект нового ускорительно-накопительного комплекса, сооружаемого в ОИЯИ. В задачи проекта входят как фундаментальные, так и прикладные исследования. Прикладные исследования подразумевают сооружение новых станций и каналов для обеспечения пучков необходимых параметров, получаемых на ускорителях комплекса NICA [2, 3].

Прикладные исследования будут проводиться в области радиобиологии, ядерной энергетики и при облучении электронных компонентов. В прикладных исследованиях будут использоваться пучки ионов высоких и низких энергий.

В канале низких энергий пучок, ускоренный в линейном ускорителе NILAS, транспортируется на СОКИТ (станция облучения короткопробежными ионами «техническая») для испытания компонентов микроэлектроники (со снятием корпуса). Общая

¹E-mail: filatov@jinr.ru

длина канала 9,6 м. При работе комплекса NISA на СОДИБ (станция облучения длиннопробежными ионами «биологическая») для облучения биологических объектов и на СОДИТ (станция облучения длиннопробежными ионами «техническая»), предназначенной для испытания компонентов микроэлектроники, пучки ионов выводятся из нуклотрона и транспортируются к этим станциям по вновь разрабатываемым каналам. Общая длина каналов для станции СОДИБ — 60,9 м, для станции СОДИТ — 66 м. Требования к пучку на станциях облучения и параметры пучка в соответствующих прикладных каналах приведены в табл. 1, 2 и 3.

Эмиттансы пучка в канале и на входе в стенд при максимальной энергии различаются (для СОДИБ и СОДИТ) в зависимости от работы нуклотрона, поэтому рассматриваются рабочие и максимальные значения эмиттанса (см. табл. 2).

Таблица 1. Параметры пучка в канале и требования к пучку ионов на станциях

Параметр	СОДИТ	СОДИБ	СОКИТ
Типы ионов	$^{12}\text{C}^{6+}$, $^{40}\text{Ar}^{18+}$, $^{56}\text{Fe}^{26+}$, $^{84}\text{Kr}^{36+}$, $^{131}\text{Xe}^{54+}$, $^{197}\text{Au}^{79}$		$^{12}\text{C}^{6+}$, $^{40}\text{Ar}^{16+}$, $^{56}\text{Fe}^{24+}$, $^{197}\text{Au}^{31+}$
Энергия ионов ускорителя, МэВ/нуклон	150–350	500–800	3,2
Вакуум, Торр	10^{-3}		$10^{-8}/10^{-5}$
Интенсивность выведенного пучка, ион/импульс	$3 \cdot 10^4 - 10^8$	$10^6 - 10^8$ ⁽¹⁾ $10^7 - 3 \cdot 10^9$ ⁽²⁾	$4 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^5$ ⁽³⁾
Плотность потока ионов, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$10^2 - 3 \cdot 10^5$	$10^3 - 10^5$	$10^3 - 3 \cdot 10^5$
Максимальный флюенс за сеанс, см^{-2}	$2 \cdot 10^7$	10^7	$2 \cdot 10^7$
Продолжительность облучения за сеанс, мин	10–20	1–5	10–20
<p>(1) Тяжелые ионы. (2) Легкие ионы. (3) Средняя интенсивность во времени.</p>			

Таблица 2. Требования к эмиттансам на станции облучения

Режим работы	Эмиттанс пучка (95%) $\varepsilon_x/\varepsilon_y$, π мм · мрад		
	СОДИТ	СОДИБ	СОКИТ
Рабочий режим	5/13	3/8	10/10
Максимальное значение (для расчета оптики)	17/25	10/15	

Облучение образцов на станциях будет производиться как в режиме с использованием сканирующих магнитов, так и без сканирования. Кроме того, одним из требований для облучения объектов микро- и наноэлектроники является 10%-я однородность облучения. Для достижения требуемой однородности облучения мишеней в режиме без сканирования для станции СОДИТ будут использованы окуптолы. В табл. 3 представлены значения размеров области облучения, однородности потока для облучения максимальной области облучения и диаметры пучка на мишени (ширина на полувысоте) в зависимости от режима.

Таблица 3. Требования к размерам и однородности пучка на станции

Параметр	СОДИТ	СОДИБ	СОКИТ
Максимальная область облучения в режиме при сканировании / без сканирования, мм	200 × 200/20 × 20	100 × 100/∅ 10	–/20 × 20
Однородность потока при облучении максимальной области при сканировании / без сканирования, %	± 15/10	± 10/5	± 10
Диаметр пучка на мишени, мм	30–57, 73*	25–35	73

* Гауссовский пучок.

ОБОРУДОВАНИЕ НОВЫХ ПРИКЛАДНЫХ КАНАЛОВ И ЕГО РАЗМЕЩЕНИЕ

Канал для транспортировки пучка к станции СОКИТ с необходимыми параметрами будет интегрирован в существующий канал перевода пучка из линейного ускорителя НИЛАС в бустер. Для уменьшения тока пучка с микроамперного уровня, получаемого в НИЛАС, до наноамперного уровня, требуемого для облучения микросхем, будет установлен поглотитель с несколькими отверстиями диаметром около 30 мкм. Получение требуемой однородности пучка на мишени будет обеспечиваться как квадрупольями, так и дипольным магнитом, обеспечивающим необходимую дисперсию в области мишени и дополнительное увеличение горизонтального размера пучка. При интеграции прикладного канала для СОКИТ с давлением 10^{-5} Торр в канал НИЛАС–бустер с давлением 10^{-8} Торр предусматривается дополнительное вакуумное оборудование (криогенная ловушка, импульсная диафрагма, насосы дифференциальной откачки), которое будет установлено после дипольного магнита, отклоняющего пучок в прикладной канал. Задачей этого оборудования является сохранение вакуумных условий в канале НИЛАС–бустер и в бустере, где давление составит 10^{-11} Торр.

Диагностическая система низкоэнергетичного канала позволит измерять поток ионов, флюенс и профиль пучка.

Новые высокоэнергетичные каналы для станций СОДИТ и СОДИБ подразумевают их интеграцию в канал медленного вывода пучка из нуклотрона. Пучок выводится из нуклотрона системой медленного вывода. Магниты Ламбертсона отклоняют пучок в вертикальной плоскости вверх для его дальнейшей транспортировки в канале медленного вывода. После прохождения дипольного магнита СП-12А пучок возвращается в горизонтальную плоскость. Параметры пучка на выходе магнита СП-12А настраиваются четырьмя линзами канала медленного вывода. Далее в измерительном павильоне корпуса № 1 пучок отклоняется в горизонтальной плоскости от основного направления на новые станции облучения СОДИТ и СОДИБ двумя существующими магнитами СП-94 (рис. 1). Каждый из новых высокоэнергетичных каналов включает в себя четыре квадрупольные линзы и два сканирующих магнита. Канал для станции СОДИТ также включает две октупольные линзы и замедлитель для обеспечения требуемой энергии ионов в диапазоне 150–350 МэВ/нуклон. Канал для СОДИБ содержит коллиматор для формирования резкой границы поля облучения на мишени.

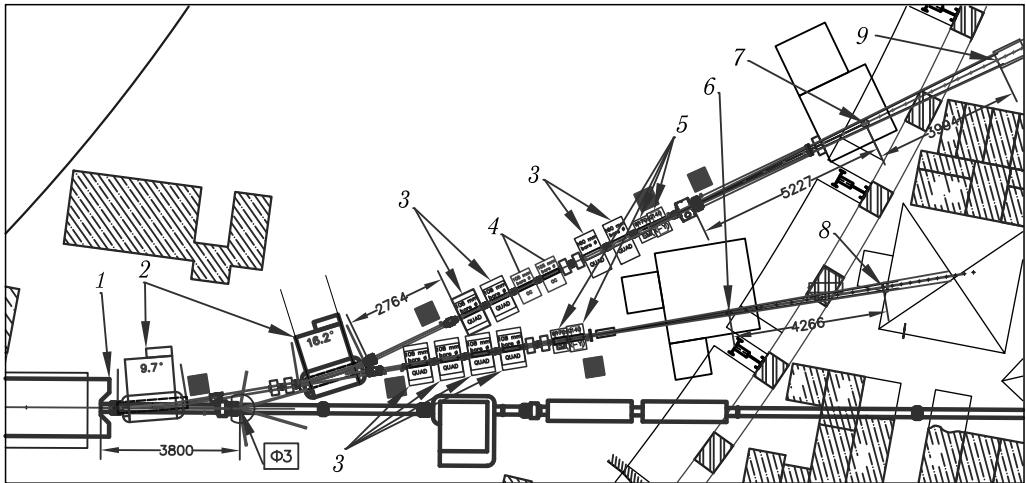


Рис. 1. Схема новых высокоэнергетичных прикладных каналов: 1 — магнит СП-12А; 2 — магниты СП-94; 3 — линзы; 4 — октуполи; 5 — сканирующие магниты; 6 — СОДИБ; 7 — СОДИТ; 8 — существующая ловушка; 9 — новая ловушка

Диагностическая система высокоэнергетичных каналов имеет возможность изменения потока, флюенса, интенсивности и профиля пучка. Детекторы будут выдвигными, на основе ионизационных камер и сцинтилляционно-файберных детекторов.

Положение элементов каналов выбрано таким образом, чтобы развести пучки на достаточное расстояние, позволяющее разместить оборудование станций СОДИТ и СОДИБ, оборудование новых прикладных каналов, а также существующего канала по переводу пучка на эксперименты в корпусе 205 и обеспечить попадание пучка в существующую ловушку (см. рис. 1).

Для отклонения пучка будут использованы существующие в ОИЯИ дипольные магниты СП-94. С этой целью были проведены магнитные измерения параметров этих магнитов и получена карта магнитного поля. Ось z направлена вдоль движения пучка и параллельна полюсам магнита. Ось y направлена вертикально вверх перпендикулярно полюсам. Ось x направлена так, чтобы образовать правую систему координат. Центр магнита принимается за начало декартовой системы координат

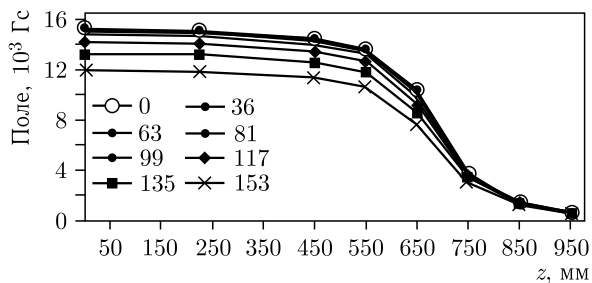


Рис. 2. Карта магнитного поля

(«правой тройки» xuz). Магнит имеет симметричную структуру, поэтому была измерена одна четверть области поля. На рис. 2 представлено значение поля вдоль z для фиксированных значений x .

ОПТИКА ПУЧКА ПЕРВОГО ПОРЯДКА

Результаты расчета динамики пучка первого порядка в каналах для станций СОКИТ и СОДИТ представлены в виде огибающих пучка в горизонтальной (ax) и вертикальной (ay) плоскостях на рис. 3. В качестве первого приближения расчет динамики в канале для станции СОКИТ проводился для поглотителя с диаметром щели 30 мкм, расположенной на горизонтальной оси пучка (диаметр и количество отверстий могут варьироваться). Настройка оптики первого порядка для СОКИТ осуществляется с помощью пяти квадрупольных линз, для СОДИБ и СОДИТ — четырьмя линзами канала медленного вывода и четырьмя линзами новых каналов.

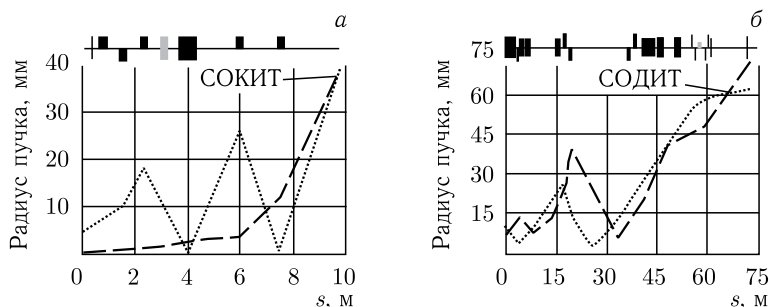


Рис. 3. Огибающие пучка при транспортировке на станции СОКИТ (а), СОДИТ (б). Пунктирная линия — огибающая в горизонтальной плоскости, штриховая — огибающая в вертикальной плоскости

Настройка оптики для СОДИБ аналогична представленной оптике для СОДИТ. Для прикладного канала станции СОДИТ поперечные размеры пучка на мишени, формируемые квадрупольными, не достаточны для обеспечения 10%-й однородности интенсивности, поэтому в канале дополнительно установлены октуполи.

ОПТИКА ПУЧКА ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА

Для расчета однородности пучка на мишени с использованием октуполей в прикладном канале для станции СОДИТ было проведено моделирование с использованием трекинга частиц. Распределение частиц в фазовом объеме пучка на входе в канал подчиняется нормальному распределению. Оптика канала настроена таким образом, чтобы обеспечить максимальное увеличение поперечных размеров пучка на мишени с размерами 20×20 мм при прохождении через канал не менее 87–95 % частиц пучка (рис. 3, б). При моделировании распределения частиц использовались два октуполя длиной 0,5 м и с градиентами до 1100 Тл/м³. Для определения однородности частиц на мишени проводилось моделирование методом трекинга для $5 \cdot 10^5$ частиц (рис. 4).

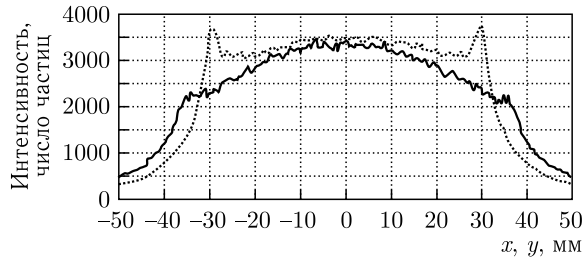


Рис. 4. Распределение частиц на мишени в зависимости от поперечных координат. Поперечные распределения обозначены пунктирной кривой в горизонтальной плоскости, сплошной — в вертикальной плоскости

В области мишени 20×20 мм однородность распределения частиц на мишени составляет около 10 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлена структура новых прикладных каналов ускорительного комплекса NICA. Новые прикладные каналы планируется ввести в эксплуатацию в 2021 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технический проект ускорительного комплекса NICA. Дубна, 2015. Т. 1. С. 9.
2. *Butenko A. et al.* Nuclotron New Beam Channels for Applied Researches // Proc. of IPAC'2017, Copenhagen, May 14–19, 2017. P. 2355.
3. *Syresin E. et al.* New Nuclotron Beam Lines and Stations for Applied Researches // Proc. of IPAC'2019, Melbourne, Australia, May 19–24, 2019. P. 449.