

УДК 621.384.633.5

ЦИКЛОТРОННЫЙ КОМПЛЕКС ДЦ-60 ДЛЯ НАУЧНО-ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ В ОБЛАСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Гикал Б.Н., Дмитриев С.Н., Гульбекян Г.Г., Богомолов С.Л., Борисов О.Н., Бузмаков В.А., Иваненко И.А., Казаринов Н.Ю., Калагин И.В., Колесов И.В., Папаш А.И., Пащенко С.В., Тихомиров А.В., Хабаров М.В. (ОИЯИ)

В Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ в сотрудничестве с ИЯФ НАН Казахстана создан специализированный комплекс на базе циклотрона ДЦ-60 для Междисциплинарного научно-исследовательского центра при Евразийском национальном университете им. Л.Н. Гумилева (Казахстан) [1]. Циклотрон ДЦ-60 предназначен для производства интенсивных пучков тяжелых ионов от лития до ксенона энергией от 0,35 до 1,77 МэВ/нуклон. На ускорителе также создан канал пучков ионов низкой энергии от 10 до 25 кэВ-заряд, получаемых из внешнего источника ионов электронно-циклотронного резонанса.

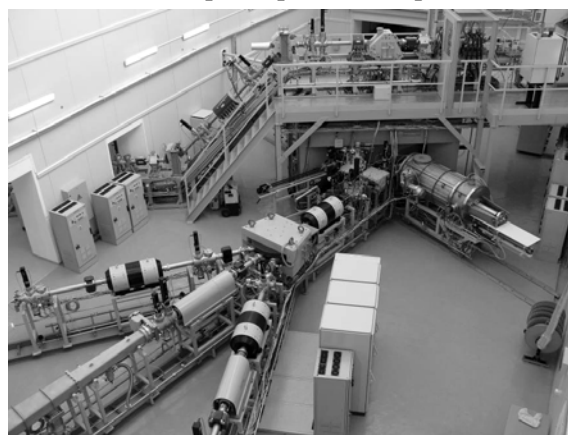
Научная программа центра направлена, главным образом, на исследования в области физики твердого тела, нанотехнологий, поверхностной модификации материалов. Циклотрон имеет три канала для пучков ускоренных ионов. Каждый канал имеет установку для проведения различных исследований. Один из каналов специализируется на производстве трековых мембран. Получение трековых мембран с помощью ускорителей тяжелых ионов является одним из важных направлений применения ядерной технологии, способным объединить различные дисциплины и отрасли и стать основой нанотехнологии и наукоемкого бизнеса. На циклотронах ЛЯР ОИЯИ на протяжении 25 лет проводятся исследования по созданию ядерных фильтров с использованием пучков тяжелых ионов, разработаны методы изготовления трековых мембран на основе разных полимерных материалов, а также технологические процессы их производства в промышленных масштабах.

Пучки ионов Ar, Kr, Xe энергией 1—1,5 МэВ/нуклон считаются оптимальными для бомбардировки полимерных пленок в целях получения трековых мембран толщиной 10—20 мкм [2]. В основу проекта циклотрона ДЦ-60 легли новые разработки и технологии, полученные в ходе создания и эксплуатации циклотронов У-400, -400М, а также циклического имплантатора ИЦ-100.

Многозарядные ионы из ЭЦР-источника поступают по каналу инжекции в центральную область циклотрона. Пучок ускоряется внутри вакуумной камеры до конечного радиуса и выводится в одну из линий транспортировки с помощью электростатического дефлектора [3].

Внешний вид комплекса представлен на рис. 1. Магнит циклотрона имеет четырехсекторную структуру. Высокочастотная ускоряющая система состоит из двух четвертьволновых резонаторов. Резонансная частота контура регулируется путем перемещения закорачивающих пластин, расположенных внутри резонансных баков. Два дуанта размещены в долинах магнита и соединены перемычкой. ВЧ-напряжение в диапазоне частот 11—17,4 МГц подается на дуанты от ВЧ-генератора мощностью 20 кВт. Система вывода пучка состоит из электростатического дефлектора и фокусирующего магнитного канала. Энергия ускоренных ионов варьируется от 0,35 до 0,8 МэВ/нуклон при ускорении на 6-й гармонике ускоряющего напряжения и от 0,75 до 1,77 МэВ/нуклон на 4-й гармонике. Система транспортировки ускоренных пучков состоит из двух каналов для научных исследований, а также специализированного канала для облучения полимерных пленок и получения трековых мембран. В состав комплекса входит также канал для проведения экспериментов на пучках ионов низкой энергии (от 10 до 25 кэВ-заряд), получаемых из ЭЦР-источника.

Основные параметры циклотрона ДЦ-60 и



Р и с. 1. Ускорительный комплекс ДЦ-60

отдельных систем следующие:

Ускоряемые ионы:

отношение массы к заряду ускоряемых ионов . . .	6—12
энергия ионов, МэВ/нуклон . . .	0,35—1,77
рабочий вакуум в камере циклотрона, Па . . .	$5 \cdot 10^{-6}$

Магнитная система:

длина/ширина/высота магнита, мм . . .	4000/1700/2300
диаметр полюса, мм . . .	1620
масса магнита, т . . .	103,5
магнитное поле, Тл . . .	1,25—1,65
число секторов . . .	4
угловая протяженность секторов (спиральность), град . . .	36—50 (прямые)
зазор между секторами, мм . . .	33
зазор в долине, мм . . .	176
зазор между сектором и полюсом, мм . . .	20
частота радиальных/вертикальных бетатронных колебаний . . .	1,04/0,45
максимальное число ампер-витков, кА·виток . . .	167
максимальный ток основной обмотки, А . . .	330
мощность питания основной обмотки магнита, кВт . . .	45

Радиальные корректирующие катушки:

число . . .	6 пар
вклад в среднее поле каждой катушки, Тл . . .	0,007—0,01
максимальный ток в обмотке, А . . .	15

Азимутальные катушки:

число . . .	2 секции по 2 пары
максимальная амплитуда 1-й гармоники в секции, Гс . . .	15

Высокочастотная ускоряющая система:

диапазон перестройки частоты резонаторов, МГц . . .	11—17,4
номинальная амплитуда напряжения на дуантах, кВ . . .	50
мощность, кВт . . .	20

ЭЦР-источник:

частота СВЧ-генератора, ГГц . . .	14,3
максимальная СВЧ-мощность, подаваемая в ЭЦР-источник, Вт . . .	1000
напряжение экстракции, кВ . . .	10—25
эмиттанс пучка (4σ) после сепарации, мм·мрад . . .	150π

Катушки ионного источника:

число . . .	2 по 5 секций
число ампер-витков, кА·виток . . .	100
максимальный ток в обмотке, А . . .	1000
потребляемая электрическая мощность, кВт . . .	70
магнитное поле на оси (максимум—минимум—максимум), Тл . . .	1,3—0,45—1,1

Гексаполь:

внутренний диаметр, мм . . .	70
внешний диаметр, мм . . .	180
длина, мм . . .	200
магнитное поле на радиусе 32 мм, Тл . . .	~1,1

Канал аксиальной инжекции пучка: 90-градусный анализирующий магнит (АМ-90):

максимальное магнитное поле, Тл . . .	0,14
радиус магнитной дорожки, мм . . .	500
межполюсный зазор, мм . . .	100
максимальное магнитное поле в соленоидах С1/С2/С3, Тл . . .	0,44/0,19/0,21
аксептанс канала, мм·мрад . . .	160π

Спиральный инфлектор:

вариант А для ускорения ионов

 $Q/Z = 6—8$ на 4-й гармонике:

магнитный радиус, мм . . .	29
электрический радиус, мм . . .	25
зазор между электродами, мм . . .	10
напряжение на электродах, кВ . . .	±7,5

вариант В для ускорения ионов

 $Q/Z = 8—12$ на 6-й гармонике:

магнитный радиус, мм . . .	35
электрический радиус, мм . . .	25
зазор между электродами, мм . . .	10
напряжение на электродах, кВ . . .	±5

Система вывода:

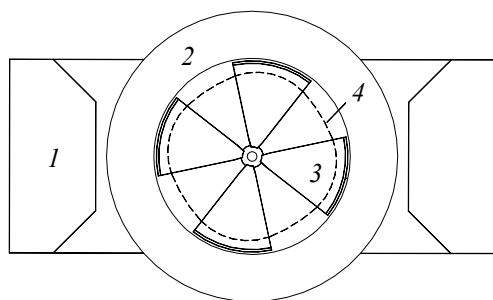
электростатический дефлектор :

азимутальная протяженность, град . . .	34
максимальное напряжение, кВ . . .	60
зазор между электродом и септумом, мм . . .	10
толщина септума из молибдена, мм . . .	0,3
пассивный магнитный канал:	
азимутальная протяженность, град . . .	28
градиент, Тл/м . . .	35—40
апертура пучка, мм . . .	25×15
горизонтальный/вертикальный эмиттанс выведенного пучка, мм·мрад . . .	15π/18π

Каналы пучков для проведения физических экспериментов:

ионов низкой энергии (10—25 кэВ·заряд) . . .	1
высокой энергии (0,35—1,77 МэВ/нуклон) . . .	3

Магнит. Электромагнит циклотрона ДЦ-60 имеет Ш-образную форму и состоит из ярма, полюсных сборок, обмоток возбуждения и корректирующих катушек (рис. 2). Необходимое распределение магнитного поля в рабочем зазоре создается с помощью четырех пар плоских секторов с прямыми границами.



Р и с. 2. Магнит циклотрона ДЦ-60: 1 — ярмо; 2 — основная обмотка; 3 — секторы; 4 — орбита на радиусе вывода

Секторы установлены со сдвигом от центра полюса, что позволяет увеличивать их азимутальную протяженность от 36 до 50° с ростом радиуса и формировать изохронное поле по радиусу. В зазоре магнита между секторами и полюсом расположены шесть пар радиальных обмоток для коррекции среднего магнитного поля и две сборки азимутальных гармонических катушек, используемых для центровки пучка и коррекции положения орбиты на радиусе вывода.

Магнитное поле сформировано на основе комплексного подхода, состоящего из трех основных этапов:

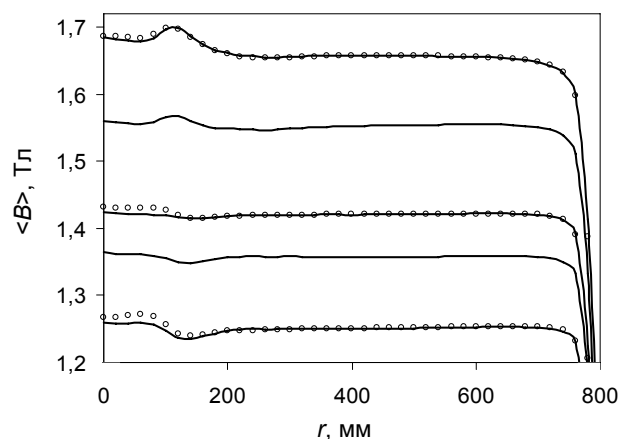
аналитический анализ магнитной структуры для выбора основных характеристик магнитной структуры и согласования с другими системами циклотрона;

численное моделирование магнитной структуры, в том числе с использованием рабочих чертежей магнита и измеренных магнитных свойств стали, из которой изготавливается магнит;

измерение магнитного поля, сравнение с расчетами [4].

Применение указанной методики позволило сформировать магнитную структуру, в которой изменение уровня среднего магнитного поля в диапазоне от $1,25$ до $1,65$ Тл не влияет на профиль поля. Распределение магнитного поля по радиусу остается близким к изохронному на всех уровнях возбуждения основной обмотки магнита (рис. 3). В основной области ускорения отклонение измеренного магнитного поля от расчетного не превышает $0,001$ Тл, что позволило отказаться от коррекции профиля поля с помощью боковых секторных накладок.

Был проанализирован суммарный вклад 1-й гармоники магнитного поля, возникающей вследствие неточностей производства и сборки



Р и с. 3. Среднее магнитное поле ДЦ-60 на пяти уровнях возбуждения основной обмотки магнита: — — измерения; $\circ$ — расчеты

магнита, а также искажения азимутальной симметрии поля, вызванного установкой магнитного канала. Для компенсации провала среднего поля и ликвидации первой гармоники от данного элемента вывода по бокам сектора, в котором расположен канал, установлены специальные накладки. При расчете профиля боковых шимм были учтены результаты измерений магнитного поля без канала, а также влияние магнитного канала на среднее поле и 1-ю гармонику в зоне ускорения пучка. Остаточная 1-я гармоника возмущения поля не превышает $(2-4) \cdot 10^{-4}$ Тл в основной зоне ускорения и полностью компенсируется гармоническими обмотками.

Эффективность ускорения пучка от центра до радиуса вывода достигает 95% , что свидетельствует об отсутствии потерь, вызванных фазовым движением. В основной зоне ускорения радиальное распределение поля в циклотроне ДЦ-60 близко к изохронному профилю, что подтверждается симметричным расположением резонансных кривых (зависимости тока пучка от уровня поля на различных радиусах). Незначительные потери пучка в процессе ускорения могут быть вызваны перезарядкой ионов на остаточном газе.

ЭЦР-источник ионов DECRIS-3. Он разработан в ЛЯР ОИЯИ [5, 6]. Для формирования требуемого профиля аксиального магнитного поля используются токовые обмотки, ярмо магнита состоит из «мягких» сортов стали. Радиальный компонент магнитного поля создается гексаполем из постоянных магнитов (материал NdFeB). Конструкция гексаполя оптимизирована таким образом, что радиальный компонент поля достигает 1 Тл в районе стенки разрядной

камеры. СВЧ-мощность, а также газообразные и твердые вещества вводятся по оси разрядной камеры, находящейся под потенциалом 25 кВ. ЭЦР-источник обладает значительным запасом интенсивности инжектируемых пучков тяжелых ионов и позволяет в широких пределах регулировать ток пучка на мишени.

Система аксиальной инжекции. Она предназначена для транспортировки ионов из ЭЦР-источника в центр циклотрона. Линия позволяет эффективно инжектировать ионы элементов от лития до ксенона с отношением массы к заряду от 6 до 12 [7]. Основными ионно-оптическими элементами канала являются анализирующий магнит, три фокусирующих солеаноида, квадрупольная линза и корректирующие дипольные магниты. Канал рассчитан с помощью библиотеки программ MCIB04 [8]. В расчетах учитывалось собственное поле пучка ионов. Среднеквадратичный эмиттанс ионов после сепарации в анализирующем магните составляет $\varepsilon(4\sigma) \sim 140\pi$ мм·мрад ($\varepsilon_{\text{норм}} \sim 0,25\pi$ мм·мрад). Акцептанс канала инжекции ДЦ-60 $A = 160\pi$ мм·мрад.

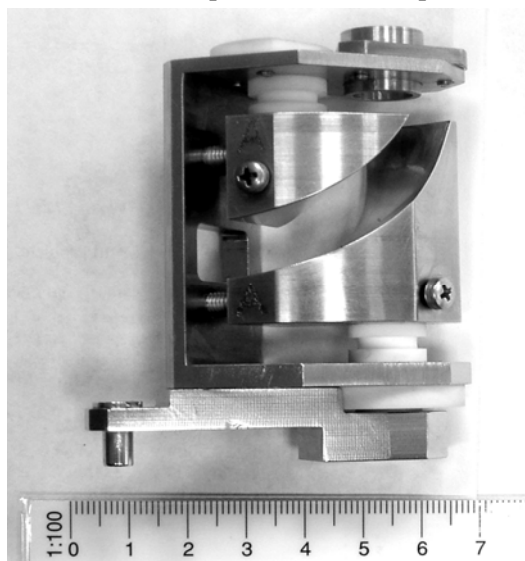
Инжектируемый пучок ионов поворачивается из аксиального канала в медианную плоскость ДЦ-60 с помощью спирального инфлектора. Входное окно инфлектора имеет прямоугольную форму с апертурой 10×20 мм (рис. 4). Для обеспечения оптимальных условий инжекции пучка во всем диапазоне ускоряемых частиц используются два варианта инфлектора: с магнитным радиусом 29 мм для ускорения ионов с $A/Z = 6—8$ на 4-й гармонике ВЧ-напряжения и с

магнитным радиусом 35 мм для ускорения ионов с $A/Z = 8—12$ на 6-й гармонике. Электрический радиус инфлектора равен 25 мм для обоих вариантов. В конструкции инфлектора изоляторы экранированы от прямого попадания пучка и распыленного материала.

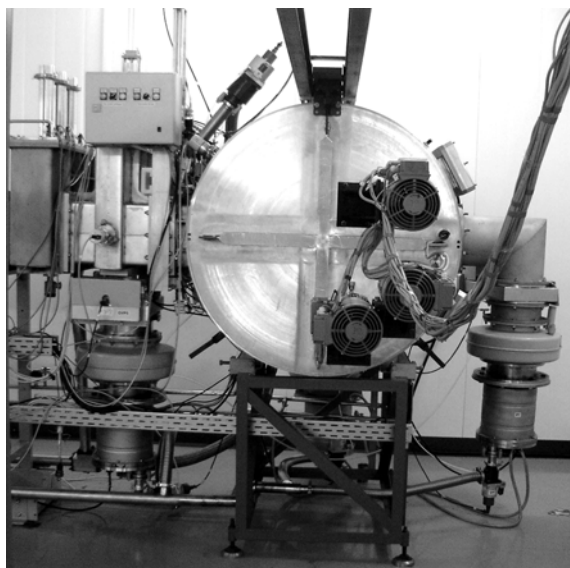
Система вывода. Она предназначена для вывода пучка из зоны ускорения, согласования с оптической системой канала транспортировки и состоит из электростатического дефлектора и фокусирующего магнитного канала азимутальной протяженностью 34° и 28° соответственно. Кривизна пластин дефлектора адаптирована для траекторий вывода различных ионов. Для подстройки траекторий изготовлена система перемещения, позволяющая независимо позиционировать вход и выход дефлектора в пределах ± 15 мм номинального положения. После дефлектора пучок проходит участок спадающего магнитного поля с сильным радиальным градиентом, вызывающим дефокусировку пучка в радиальном направлении. Для компенсации эффекта в ДЦ-60 установлен пассивный фокусирующий магнитный канал сложного профиля, что позволило выводить пучок тяжелых ионов за пределы вакуумной камеры циклотрона с эффективностью 70%.

Система транспортировки ионных пучков. Она состоит из трех каналов, два из которых используются для проведения научно-прикладных исследований, один для производства трековых мембран [9]. Выводной магнит позволяет корректировать ось пучка в пределах $\pm 2,5^\circ$. Дублет квадрупольных линз формирует промежуточный фокус пучка в центральной точке коммутирующего магнита. Далее пучок транспортируется оптическими элементами каждого канала и формируется на мишени в соответствии с требованием физического эксперимента.

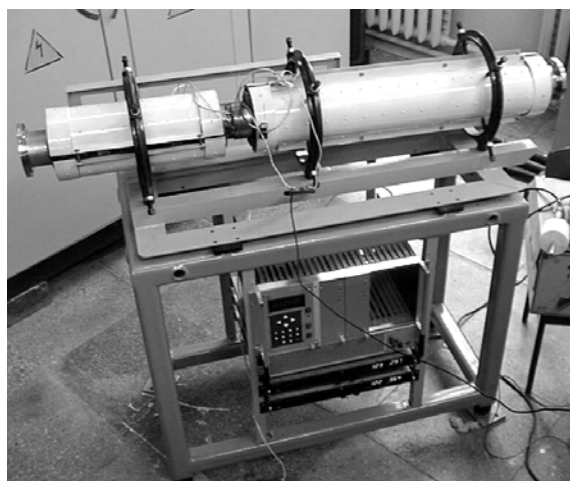
В состав канала для производства трековых мембран входит установка для облучения полимерной пленки с механизмом перемотки (рис. 5), а также система сканирования пучка в двух плоскостях (рис. 6). Вдоль канала установлена система дифференциальной вакуумной откачки, полностью отделяющая вакуумный объем циклотрона от камеры облучения полимерной пленки. Дифференциальная система откачки состоит из четырех турбонасосов и двух форвакуумных линий. Система сканирования



Р и с. 4. Спиральный инффлектор варианта А (магнитный радиус 29 мм)



Р и с. 5. Установка для облучения полимерной пленки



Р и с. 6. Сканирующая система канала для облучения пленки

ионного пучка обеспечивает облучение стационарной мишени размером 600×220 мм с однородностью распределения частиц по облучаемой площади не хуже $\pm 5\%$. При транспортировке ионов в каналы для проведения научно-прикладных исследований пучок поворачивается коммутирующим магнитом на угол $\pm 30^\circ$. В каждом канале пучок фокусируется дублетом линз, коррекция положения пучка осуществляется парой корректирующих магнитов.

Исследование режимов ускоренных пучков. Во время пусконаладочных работ, проведенных на циклотроне ДЦ-60 после его окончательной сборки, были исследованы различные режимы ускорения ионов в широком диапазоне изменения отношения массы к заряду A/Z на всех уровнях магнитного поля. В результате пусконаладочных работ были оптимизированы

режимы работы ЭЦР-источника, выполнена настройка всех систем ускорителя, а также проведена настройка канала для облучения трековых мембран, включая систему сканирования, оптические элементы и механизм перемотки пленки.

Циклотрон создавался для ускорения ионов в диапазоне отношения массы к заряду A/Z от 6 до 12. Энергия пучка варьируется от 0,35 до 1,77 МэВ/нуклон. Магнитное поле изменяется от 1,25 до 1,65 Тл, частота ВЧ-напряжения — от 11 до 17,4 МГц. Рост поля от центра до конечного радиуса, обусловленный релятивистским увеличением массы, составляет от $6 \cdot 10^{-4}$ до $2,6 \cdot 10^{-3}$ Тл в зависимости от энергии ускоряемого иона.

На ДЦ-60 получены проектные параметры ускоренных и выведенных пучков ионов, а также выполнены эксперименты с пучками заряженных частиц в широком диапазоне изменения A/Z и энергии, в том числе:

исследованы режимы ускорения ионов азота, аргона, криптона ($^{14}\text{N}^{2+}$, $^{40}\text{Ar}^{4+}$, $^{40}\text{Ar}^{5+}$, $^{40}\text{Ar}^{7+}$, $^{84}\text{Kr}^{12+}$) на различных уровнях возбуждения основной обмотки магнита, а также частот и гармоник ВЧ-ускоряющего напряжения;

реализованы режимы оперативной коррекции магнитного поля радиальными катушками циклотрона;

выполнены эксперименты по повышению интенсивности ускоренных ионов с помощью системы группирования пучка;

изучена зависимость эффективности ускорения сгруппированного и несгруппированного пучка от тока инжектируемых ионов;

выведен в ионно-оптический канал и проведен до технологической установки по облучению полимерной пленки пучок ионов криптона $^{84}\text{Kr}^{12+}$ током до 2 мкА;

сформировано поле облучения пленки с требуемой плотностью потока частиц и однородностью и проведена экспериментальная работа трековых мембран.

Параметры пучков ионов, выбранных для ускорения в тестовых режимах, и соответствующие значения основных систем циклотрона приведены в таблице. Во время испытаний пучок ионов по каналу аксиальной инжекции циклотрона был проведен с эффективностью не хуже 70%. Ток пучка после сепарации в анализирующем магните измеряли с помощью цилиндра Фарадея, установленного в вертикальной секции канала. Интенсивность инжектируемого пучка измеряли на нижнем электроде инфлектора.

Параметры пучков, ускоренных на циклотроне ДЦ-60

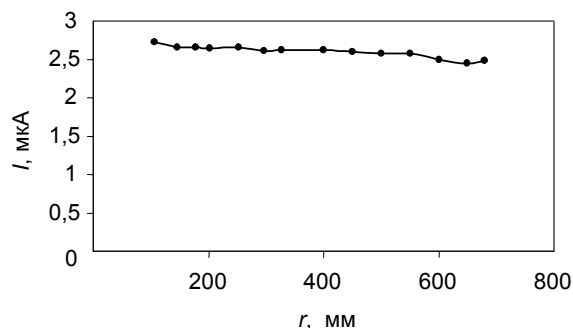
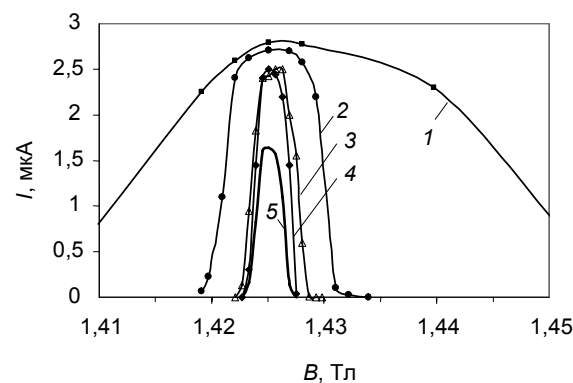
Ион	A/Z	E/A , МэВ/нуклон	B , Тл	$f_{вч}$, МГц	$f_{вч}/f_{орб}$	I , мкА	
						в центре	на выводе
$^{14}\text{N}^{2+}$	7	1,05	1,42	12,67	4	10,5	10
$^{14}\text{N}^{2+}$	7	1,32	1,64	14,42	4	1,6	1,4
$^{20}\text{Ne}^{3+}$	6,67	1,03	1,4	13,1	4	2,2	2
$^{22}\text{Ne}^{2+}$	11	0,38	1,4	11,65	6	1,9	1,7
$^{40}\text{Ar}^{4+}$	10	0,5	1,42	13,2	6	1,5	1,3
$^{40}\text{Ar}^{4+}$	10	0,65	1,64	15	6	1,5	1,3
$^{40}\text{Ar}^{5+}$	8	0,58	1,25	14,42	6	1	0,6
$^{40}\text{Ar}^{5+}$	8	0,98	1,63	12,4	4	0,6	0,5
$^{40}\text{Ar}^{6+}$	6,67	1,06	1,4	12,8	4	2	1,9
$^{40}\text{Ar}^{7+}$	5,71	1,14	1,25	13,6	4	1,9	1,8
$^{84}\text{Kr}^{12+}$	7	1,05	1,42	12,67	4	2,7	2,5

Эффективность захвата несгруппированного пучка в режим ускорения составляет 5—6% при работе на 4-й гармонике ВЧ-напряжения и около 3—4% при ускорении на 6-й гармонике. Фазовый аксептанс циклотрона ДЦ-60 составляет $\sim 30^\circ$. Уменьшение коэффициента захвата при ускорении на 6-й гармонике можно объяснить более сильным влиянием времени пролета ускоряющих промежутков на первом обороте. Использование системы группирования пучка позволило повысить коэффициент захвата ионов в режим ускорения в 2,5—3,7 раза по сравнению с несгруппированным пучком.

В процессе магнитных измерений радиальное распределение поля корректировали таким образом, чтобы форма поля по возможности совпадала с изохронным профилем на уровне $B_0 = 1,42$ Тл. При ускорении $^{84}\text{Kr}^{12+}$, $^{14}\text{N}^{2+}$ и $^{40}\text{Ar}^{4+}$ на этом уровне поля включения корректирующих обмоток не потребовалось. Эффективность ускорения от центра до конечного радиуса циклотрона составляет не менее 95% (рис. 7). Потери пучка внутри циклотрона, вызванные перезарядкой ионов на остаточном газе, фазовые потери и вертикальные потери на кромках дуантов составляют не более 5%, что является допустимым при ускорении тяжелых ионов.

В ходе экспериментов были сняты резонансные зависимости тока пучка от уровня поля на различном радиусе ускорения внутри циклотрона, а также для выведенного пучка (рис. 8). Симметричное положение резонансных кривых и отсутствие каких-либо заметных потерь в процессе ускорения являются экспериментальным подтверждением высокого качества формирова-

ния магнитного поля циклотрона ДЦ-60. Для эффективного ускорения пучка на других уровнях поля используются корректирующие катушки, позволяющие минимизировать отклонение поля от изохронного профиля. Для проверки эффективности работы системы корректирующих обмоток были ускорены ионы аргона $^{40}\text{Ar}^{7+}$ на нижнем уровне поля 1,25 Тл, а также ионы $^{14}\text{N}^{2+}$ и $^{40}\text{Ar}^{7+}$ на верхнем уровне поля 1,64 Тл. После коррекции коэффициент прохож-

Р и с. 7. Радиальная зависимость тока пучка $^{84}\text{Kr}^{12+}$ Р и с. 8. Резонансные кривые зависимости тока пучка $^{84}\text{Kr}^{12+}$ от поля циклотрона на радиусе 200 (1), 400 (2), 600 (3), 680 мм (4) и цилиндре Фарадея, установленном в канале транспортировки выведенного пучка (5)

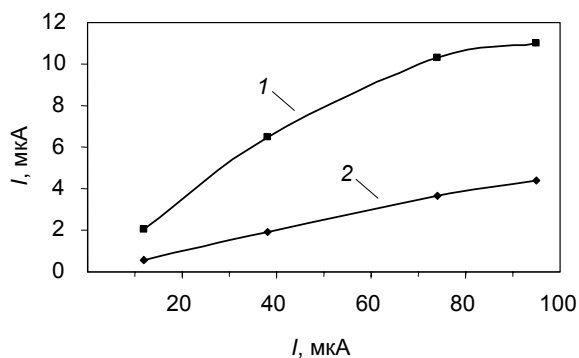
дения пучка от центра до конечного радиуса ускорения составил более 90%.

Был измерен ток пучка в зависимости от амплитуды ускоряющего напряжения и показано, что при напряжении 50 кВ, близком к расчетному, пучок полностью огибает элементы центральной оптики циклотрона.

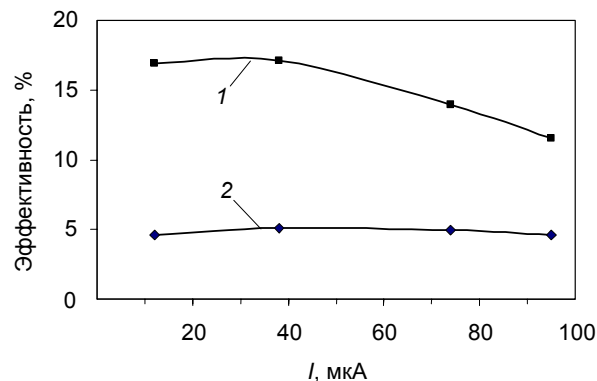
Для повышения эффективности захвата ионов в процессе ускорения в канале аксиальной инжекции установлена система группирования пучка с синусоидальным напряжением. Устройство расположено на расстоянии 1670 мм от медианной плоскости циклотрона. Система группирования модулирует плотность частиц, инжектируемых в циклотрон, и таким образом увеличивает ток ускоренного пучка. Вместе с тем увеличение плотности ионов в сгустке приводит к усилению эффекта пространственного заряда в продольном направлении, что ограничивает эффективность группирования пучка. Экспериментально группировка пучка с учетом продольного расталкивания исследована при ускорении $^{14}\text{N}^{2+}$ (рис. 9, 10).

Во время пусконаладочных работ наиболее тщательно был исследован режим инжекции, ускорения и вывода пучка ионов $^{84}\text{Kr}^{12+}$. С включенной системой группирования около 25% инжектируемых ионов захватывается в режим ускорения. От центра до конечного радиуса ускорения 93% пучка. Около 66% ускоренного до конечной энергии пучка выводится через дефлектор и магнитный канал в линию транспортировки. Общая эффективность прохождения пучка от источника до мишени находится в пределах от 5 до 10%.

На пучке ионов $^{84}\text{Kr}^{12+}$ было проведено тестовое облучение полимерной пленки толщиной 12 мкм. После химической обработки пленки были получены трековые мембраны плотностью



Р и с. 9. Зависимость тока ускоренного пучка $^{14}\text{N}^{2+}$ с системой группирования пучка (1) и без нее (2) от интенсивности ионов в канале инжекции

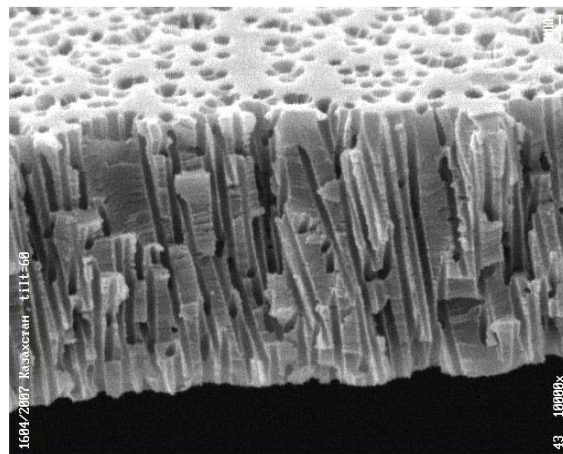


Р и с. 10. Эффективность захвата в режим ускорения ионов $^{14}\text{N}^{2+}$ с системой группирования пучка (1) и без нее (2) как функция тока инжектируемого пучка

отверстий $2 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$. Однородность распределения пор как по ширине, так и по длине пленки не хуже 5%, что согласуется с требованиями промышленного производства трековых мембран (рис. 11).

На ДЦ-60 были ускорены пучки $^{14}\text{N}^{2+}$, $^{20}\text{Ne}^{2,3+}$, $^{40}\text{Ar}^{4,5,6,7+}$, $^{84}\text{Kr}^{12+}$. Полученная интенсивность не является предельной, так как целью экспериментов была отработка режимов работы систем ускорителя. В дальнейшем планируется увеличить интенсивность пучка легких ионов до 30 мкА, ионов криптона до 5 мкА и ионов ксенона до 3 мкА.

Заключение. Представленные в работе результаты являются первыми, полученными в ходе пусконаладочных работ. В дальнейшем можно ожидать увеличения интенсивности пучков и расширения диапазона ускоряемых ионов. В заключение авторы выражают благодарность всем сотрудникам ЛЯР ОИЯИ и ИЯФ НАН Казахстана, принимавшим участие в создании и пуске ускорительного комплекса.



Р и с. 11. Трековая мембрана с диаметром пор 0,4 мкм, плотностью $2 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гикал Б.Н., Иткис М.Г., Кадыржанов К.К. и др. Обоснование создания в Евразийском национальном университете им. Л.Н. Гумилева междисциплинарного научно-исследовательского комплекса на базе ускорителя тяжелых ионов. Отчет. Алма-Ата, 2003. 67 с.
2. Ferain E., Legras R. Characterization of nanoporous particle track etched membranes. — Nucl. Instrum. Meth. in Phys., 1977, v. 131, p. 97—102.
3. Gikal B., Gulbekian G., Dmitriev S. e.a. Project of the DC-60 cyclotron with smoothly ion energy variation for research center at L.N. Gumilev Euroasia state university in Astana (Kazakhstan). — In: Proc. XVII Intern. Conf. on Cyclotrons and Their Applications. Tokyo, Japan, 2004, p. 205—207.
4. Гикал Б.Н., Гульбекян Г.Г., Иваненко И.А. и др. Формирование магнитного поля циклотрона ДЦ-60: Препринт ОИЯИ Р9-2006-151, 2006. 12 с.
5. Efremov A., Kutner V., Bogomolov S. e.a. Ion source DECRIS-3. — In: Proc. of the 14th Intern. Workshop on ECRIS. CERN, Geneva, Switzerland, 1999, p. 31—34.
6. Efremov A., Kutner V., Bogomolov S. e.a. Design aspect and status of construction of the mVINIS ion source. — Rev. Sci. Instrum., 1998, v. 69, № 2, p. 679—681.
7. Гикал Б.Н., Гульбекян Г.Г., Казаринов Н.Ю. и др. Канал аксиальной инжекции циклотрона ДЦ-60. Сообщение ОИЯИ Р9-2006-39, 2006. 17 с.
8. Alexandrov V., Kazarinov N. Space charge dominated beam. — In: Proc. of the Workshop on Physics for Heavy Ion Fusion ECR-Sources. Riken, Japan, 1998, p. 49—51.
9. Гикал Б.Н., Гульбекян Г.Г., Калагин И.В. и др. Система транспортировки пучков тяжелых ионов, выведенных из циклотрона ДЦ-60. Сообщение ОИЯИ Р9-2006-37, 2006. 12 с.

Поступила в Редакцию 23.07.07

УДК 621.039.31

ОЦЕНКА МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО ПОТОКОВ ЧАСТИЦ В ТОНКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТЕКТОРАХ

Гуревич М.И., Тельковская О.В., Шкаровский Д.А. (РНЦ «Курчатовский ин-т»)

При решении задач переноса частиц методом Монте-Карло существует трудность оценок интегралов потока по очень маленьким объемам [1]. Любой детектор, введенный в систему, не может быть большим, иначе он бы влиял на всю структуру потока частиц. Значительная часть неаналоговых методов была разработана для расчета таких интегралов [1, 2]. Метод Монте-Карло позволяет даже без неаналоговых методов решать эту задачу тогда, когда малый объем области связан с малостью лишь одного измерения — тонких пленок. В этом случае применяется оценка по пробегам [1—3].

Хорошо известен алгоритм оценки потока в точке [2], но он предполагает либо изотропность потока, что есть грубое приближение, либо наличие эффективного алгоритма расчета дифференциального сечения рассеяния, что часто не осуществимо или очень трудоемко.

Точку можно назвать нульмерным детектором, встречаются и одномерные детекторы. Например, родиевый детектор ВРК имеет диаметр во много раз меньше, чем его высота. В работе предложены алгоритмы получения несмещен- где оператор T описывает создание частицами потока до первого столкновения; S — оператор

ных оценок для интегралов потоков в одномерных детекторах, которые достаточно эффективно реализуются в программных комплексах типа MCU [3].

Обозначения и основные предположения.

Координаты фазового пространства используются в виде $(\mathbf{r}, \Omega, E)$, где $\mathbf{r}$ — радиус-вектор положения частицы; Ω — направление полета; E — энергия.

Все процессы происходят в области фазового пространства $C_0 \times S^2 \times [0, \infty)$, где C_0 — замкнутая ограниченная выпуклая область; S^2 — двумерная сфера единичного радиуса. На границах области C_0 заданы условия поглощения. Используются следующие функции на фазовом пространстве: q — внешний источник нейтронов; Φ — поток нейтронов; g — плотность генерации нейтронов деления; f_c — плотность столкновений нейтронов с ядрами вещества; f_s — плотность рассеяния нейтронов ядрами.

Неоднородное стационарное кинетическое уравнение может быть записано как [4—6]:

$$\Phi = T(f_s + g + q); \quad f_c = \Sigma_t \Phi; \quad f_s = S f_c; \quad g = F f_c, \quad (1)$$

рассеяния; F — оператор генерации нейтронов