https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-2-165-173
УДК 621.384.633.5

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ УСКОРИТЕЛЯ ДЦ-60 ДЛЯ ОБЛУЧЕНИЯ ПЭТФ-ПЛЁНОК ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ Kr

А. М. Темір[1*], И. А. Иванов[1,2], М. В Колобердин[1], А. Д. Сапар[1,2], Д. А. Мустафин[1], Е. О. Унгарбаев[1], Е. В. Бихерт[1], Б. С. Аманжулов[1], А. С. Сейтбаев[1,2], С. С. Сембаев[1,2], И. К. Тлеубай[1,2]

[1] РГП «Институт ядерной физики» МЭ РК, Алматы, Казахстан
[2] Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

** E-mail для контактов: adilettemir.kz@gmail.com*

В статье рассматривается настройка и оптимизация режима работы циклотрона ДЦ-60 для облучения полиэтилентерефталатных (ПЭТФ) пленок тяжелыми ионами криптона с целью создания трековых мембран. Описаны этапы настройки ускорителя, включая расчеты параметров ускорительного процесса, а также настройку сверхвысокочастотной (СВЧ) системы для генерации плазмы криптона. Рассмотрены ключевые параметры, такие как ток магнита, напряжения инфлекторов и дефлектора, а также характеристики пучка на выходе из ускорителя. Особое внимание уделено системе транспортировки и фокусировки пучка, а также оптимизации условий облучения для достижения необходимой точности и воспроизводимости экспериментов. Полученные результаты имеют важное значение для дальнейшего развития методик ионно-трековой модификации полимерных материалов и их применения в различных технологических и коммерческих сферах.

Ключевые слова: *тяжелые ионы, криптон, ускоритель, облучение пленки, ПЭТФ.*

Введение

Циклотрон ДЦ-60, предназначен для ускорения и вывода пучков положительно заряженных ионов с отношением A/Z от 6 до 12 и энергиями 0,3÷1,75 МэВ/нуклон. Основной задачей данного ускорительного комплекса является производство трековых мембран (ТМ) путём облучения полимерных пленочных материалов в промышленных или полупромышленных объемах, а также проведение физических исследований [1].

Настройка характеристик ускорителя ДЦ-60 для облучения полиэтилентерефталатных (ПЭТФ) пленок тяжелыми ионами криптона (Kr) является важнейшей задачей при разработке трековых мембран и изучении воздействия на полимерные материалы. Современные технологические процессы требуют высокоточного контроля параметров ионного пучка и условий облучения для получения материалов с заданными свойствами.

Трековые мембраны широко используются в процессах микрофильтрации, включая разделение вирусов, фракционирование коллоидных растворов и медицинские процедуры, такие как гемофильтрация и плазмаферез (отделение клеток крови от плазмы). Кроме того, эти мембраны используются при изготовлении химических и биохимических сенсоров [2–6]. Значительное количество исследований посвящено применению трековых мембран при создании металлических наноструктур [7, 8]. Недавние исследования также продемонстрировали их потенциал для разработки нанокомпозитов на основе полимеров, включая функциональные покрытия для аэрокосмических применений [9–11].

Для эффективного облучения ПЭТФ-плёнок ионами Kr на ускорителе ДЦ-60 требуется комплексная оптимизация всех этапов настройки ускорительной системы. На первом этапе рассчитываются параметры ускорительного процесса в зависимости от требуемой энергии ионов. Выполняется настройка СВЧ-системы ионного источника для стабильной генерации плазмы криптона, от чего зависит интенсивность и устойчивость пучка.

Далее производится регулировка магнитной системы, включая токи на поворотных магнитах, а также настройка напряжений на инфлекторе и дефлекторе для эффективной инжекции ионов в ускоряющий канал. На выходе из ускорителя контролируются характеристики пучка: энергия, ток, форма, что критично для равномерного облучения образцов.

Завершающий этап включает настройку системы транспортировки и фокусировки пучка с использованием магнитных линз и корректирующих элементов, обеспечивающих доставку ионов к мишени с минимальными потерями и высокой стабильностью.

Актуальность настоящей работы заключается в необходимости рационального подбора параметров ускорителя ДЦ-60 для обеспечения стабильного формирования треков с заданной плотностью.

Основной целью данного исследования является повышение точности и воспроизводимости экспериментов по ионной модификации пленок ПЭТФ, тем самым расширяя их практическое применение в передовых технологиях.

Для достижения этой цели в работе решаются следующие задачи: определение оптимального диапазона энергий, обеспечивающих формирование непрерывных треков по всей толщине пленки; анализ допустимых рабочих режимов ускорителя ДЦ-60 для реализации заданных параметров ионного пучка.

Научная новизна работы заключается в поэтапной настройке всех компонентов ускорителя для достижения требуемых параметров пучка, что предоставляет высокую степень контроля над пространственным распределением пор при их формировании.

Расчёт энергетических потерь и области применения циклотрона ДЦ-60 в производстве трековых мембран

Циклотрон ДЦ-60 является ускорителем заряженных частиц, который ускоряет ионы от ^{7}Li до ^{132}Xe в диапазоне энергий от 0,35 до 1,75 МэВ/нуклон. Облучение полимерных пленок осуществляется в канале Т1 ускорителя. В основном на циклотроне производится облучение ПЭТФ и поликарбонатных (ПК) полимеров. В качестве налетающих частиц для производства ТМ обычно используют ионы аргона, криптона и ксенона. Выбор данных частиц основывается на том, что для этих частиц удельные ионизационные потери в ПЭТФ и ПК пленках находятся в пределах 5–15 МэВ/мкм, что способствует равномерному разрушению химических связей в полимере.

Для выбора оптимальных условий ионного облучения полимерных плёнок необходим расчёт проективного пробега и линейной передачи энергии (ЛПЭ) ионов Ar, Kr и Xe в ПЭТФ. Проективный пробег определяет глубину залегания области максимальных повреждений, критичную для формирования пор с заданной геометрией. ЛПЭ характеризует плотность энерговыделения вдоль траектории иона и, соответственно, степень разрушения полимерной структуры, необходимую для образования треков. Корректный выбор параметров ионного пучка позволяет контролировать глубину, интенсивность и профиль модификации материала. Расчётные данные, полученные, с использованием пакета SRIM/TRIM, обеспечивают надёжное обоснование технологических режимов и моделирование формирования трековых структур с высокой избирательностью травления.

При прохождении через вещество ускоренные ионы теряют энергию посредством взаимодействия с электронами (электронные потери энергии) и ядрами (ядерные потери энергии).

Электронные потери энергии приводят к возбуждению электронных оболочек атомов мишени и ионизации. Ядерные потери энергии обусловлены упругими столкновениями с атомами мишени. Другие потери энергии, например, тормозное излучение, очень малы и ими можно пренебречь [12].

На рисунках 1а, 1в и 1д показаны зависимости электронных и ядерных потерь от энергии частицы. Кривые построены при помощи программы Stopping and Range of Ions in Matter (SRIM-2013) [13] для ионов Ar, Kr и Xe с энергией от 0,1 до 3 МэВ/нуклон. Из приведенных графиков видно, что при энергиях выше 0,1 МэВ/нуклон преобладают электронные потери энергии. На рисунках 1б, 1г и 1е показаны электронные, ядерные и полные потери энергии для вышеперечисленных ионов энергией от 0 до 5 МэВ перед непосредственной остановкой иона в полимере. Из данных кривых видно, что при малых энергиях ядерные потери энергии преобладают. На кривой полных потерь энергии виден пик Брэгга перед полной остановкой иона.

На рисунке 2 изображены проективные пробеги для случаев взаимодействия ионов Ar, Kr и Xe с ПЭТФ пленкой, рассчитанные при помощи программы SRIM-2013. На графике области, выделенные зеленым цветом – области энергий ионов, в пределах которых возможно производить облучение на циклотроне ДЦ-60. Нижнюю границу пробега всегда возможно уменьшить при использовании соответствующих «тормозящих» фольг.

В реальном случае интенсивность пучка не является постоянной величиной, и колеблется как по величине, так и в пространстве около одного положения. Данные флуктуации и приводят к разбросу плотности пор по длине и ширине облучаемой пленки. Как показала практика, при правильной настройке режима облучения можно облучить полимерную пленку с разбросом по плотности не выше 10%, что удовлетворяет требованиям большинства заказчиков ТМ.

При облучении полимерных плёнок ионами с высокой линейной передачей энергии (ЛПЭ) в материале формируются треки с высокой плотностью ионизации, что приводит к локальной деструкции полимерных цепей и изменению химической структуры. Повреждённые области становятся значительно более подверженными химическому травлению, в отличие от неповреждённой матрицы. Это обеспечивает высокую избирательность травления, необходимую для формирования наноканалов или пор. Оптимальный диапазон ЛПЭ (5–15 МэВ/мкм) позволяет достичь баланса между глубиной повреждения и контрастностью травления.

Настройка режима облучения ПЭТФ-плёнок тяжелыми ионами криптона

Перед началом проведения экспериментов, связанных с формированием, ускорением, и транспортировкой пучков ионов криптона на ускорительном комплексе ДЦ-60, были выполнены детальные расчёты оптимального режима работы установки. Для этого использовалось специализированное программное обеспечение «DC-60 calc», предназначенное для моделирования и расчёта параметров ускорительного процесса с учётом характеристик ускоряемых частиц и заданных условий эксперимента.

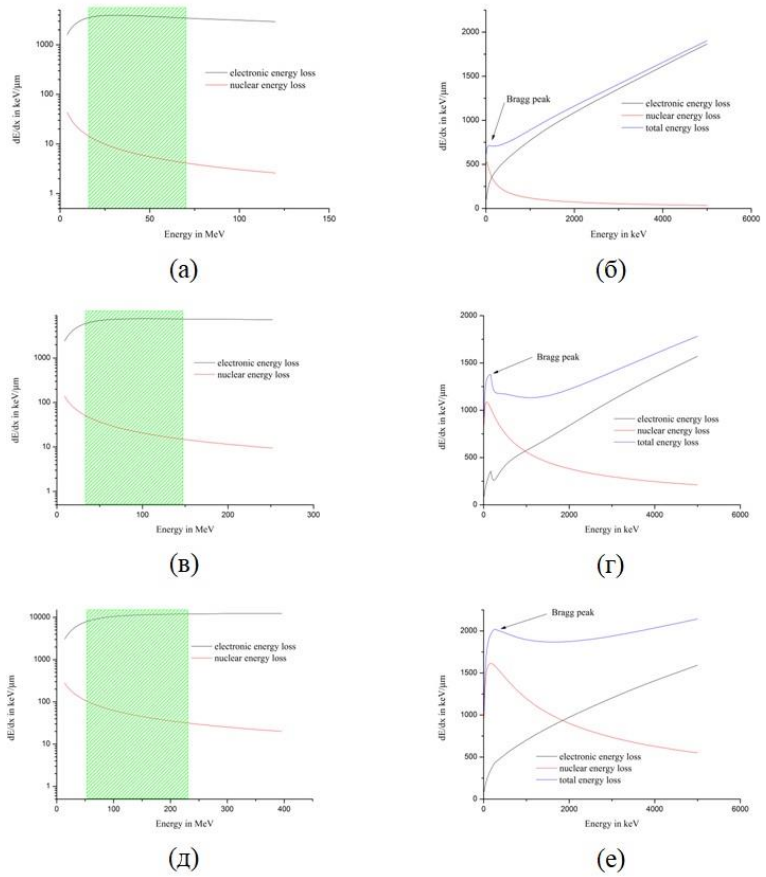


Рисунок 1. Энергетические потери ионов налетающих частиц Ar, Kr и Xe в ПЭТФ плёнке, рассчитанные при помощи программы SRIM: Ar (а), Kr (в) и Xe (д) – при высоких энергиях; Ar (б), Kr (г) и Xe (е) – при низких энергиях (зеленным указана область доступной энергии частиц на ДЦ-60)

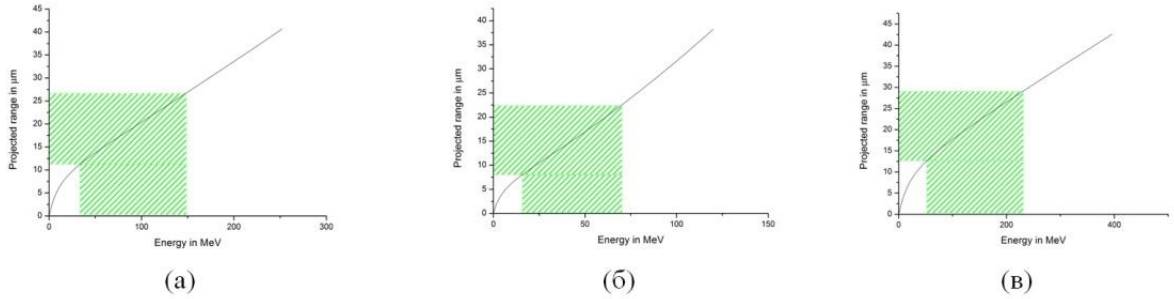


Рисунок 2. Проективный пробег ионов: (а) Ar, (б) Kr и (в) Xe в плёнке ПЭТФ, рассчитанный при помощи программы SRIM-2013 (зеленным указаны области применимости циклотрона ДЦ-60)

Расчёты позволили определить оптимальные значения ключевых параметров, таких как напряжённость электрического ($U_{injection}$, $E_{инфлектор}$) и магнитного (B_0, B_e) полей, частота ускоряющего высокочастотного (ВЧ) поля, траектория движения ионов внутри ускорителя, параметры пучка на выходе из ускорительного тракта и эффективность его транспортировки к экспериментальной установке [14].

На основе полученных данных был сформирован рабочий режим ускорения пучков ионов криптона с заданной энергией, обеспечивающий необходимую стабильность ионного пучка, минимизацию потерь частиц в процессе ускорения и транспортировки, а также соответствие параметров пучка требованиям экспериментального задания. Основные параметры данного режима работы приведены в таблице 1.

В рамках исследования были проведены работы по настройке параметров сверхвысокочастотного (СВЧ) разряда для генерации плазмы криптона. В ходе эксперимента мощность СВЧ-излучения была установлена на уровне 280 Вт, что обеспечило оптимальные условия для ионизации криптона и формирования стабильного плазменного разряда.

Таблица 1. Расчет параметров режима формирования и ускорения пучка ионов Kr^{15+} с энергией 1,75 МэВ/нуклон для циклотрона ДЦ-60

Ион A/Z	5,6	**ВЧ, МГц**	16,620
Поле B_0, Тл	1,5152	**ВЧ Гармоника**	4
Поле B_e, Тл	1,5180	**$U_{injection}$, кВ**	16,6
Энергия, МэВ/нукл	1,75	**Тип инфлектора**	«A»
Ток магнита, А	247,9	**$E_{инфлектор}$, кВ**	±6,7

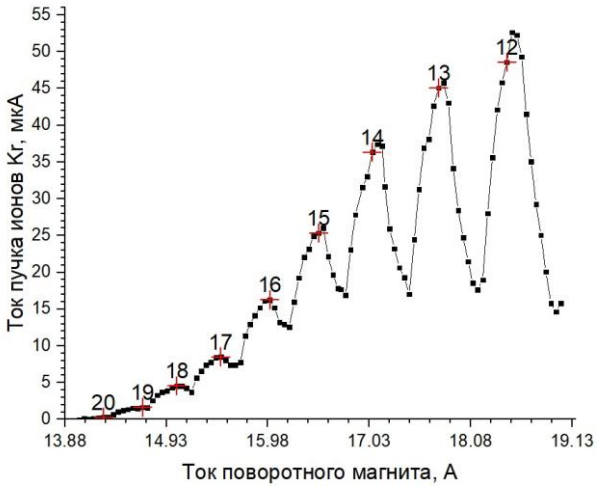


Рисунок 3. Спектр ионов криптона

Спектр ионов криптона, представленный на рисунке 3, отражает относительное распределение различных зарядовых состояний ионов криптона, что позволяет оценить эффективность работы источника плазмы и его соответствие требованиям эксперимента.

Для эффективной экстракции ионов криптона с зарядовым состоянием 15+ и энергией 1,75 МэВ/нуклон на высоковольтный электрод (HV ECR) было подано напряжение 16,6 кВ. Значение рассчитано с использованием ПО «DC-60 calc», моделирующего оптимальные режимы работы ускорительного комплекса. Также в ходе эксперимента было определено оптимальное давление подачи рабочего газа (криптона) в ионизационную камеру источника, составившее $2{,}7 \cdot 10^{-7}$ Торр. Данный уровень давления обеспечивал стабильную генерацию плазмы.

В ходе настройки основного магнита был установлен ток 243,4 А, что обеспечило необходимую конфигурацию магнитного поля для стабильного удержания и транспортировки ионного пучка [15]. Напряжения на инфлекторах CINF+ и CINF− были установлены на уровнях 6,71 кВ и 6,38 кВ соответственно, что способствовало корректному вводу ионов в ускоряющую область циклотрона.

Для дефлектора CESD, отвечающего за вывод ионного пучка, было выбрано напряжение 59,69 кВ. Оптимальные значения этих параметров были определены на основе экспериментальных расчетов и приведены на рисунке 5. Выполненная настройка позволила обеспечить стабильную работу системы, минимизировать потери ионов и достичь требуемых условий для проведения эксперимента.

Настройка систем циклотрона для выбранного режима ускорения была выполнена на основе расчётных данных, указанных в таблице 1.

В процессе настройки ВЧ-системы, представленной на рисунке 6, была проведена детальная оптимизация параметров с целью достижения максимальной эффективности ускорительного комплекса. Одним из ключевых параметров, подлежащих регулировке, являлась мощность ВЧ-генерации, которая в результате настроек была установлена на уровень 80%.

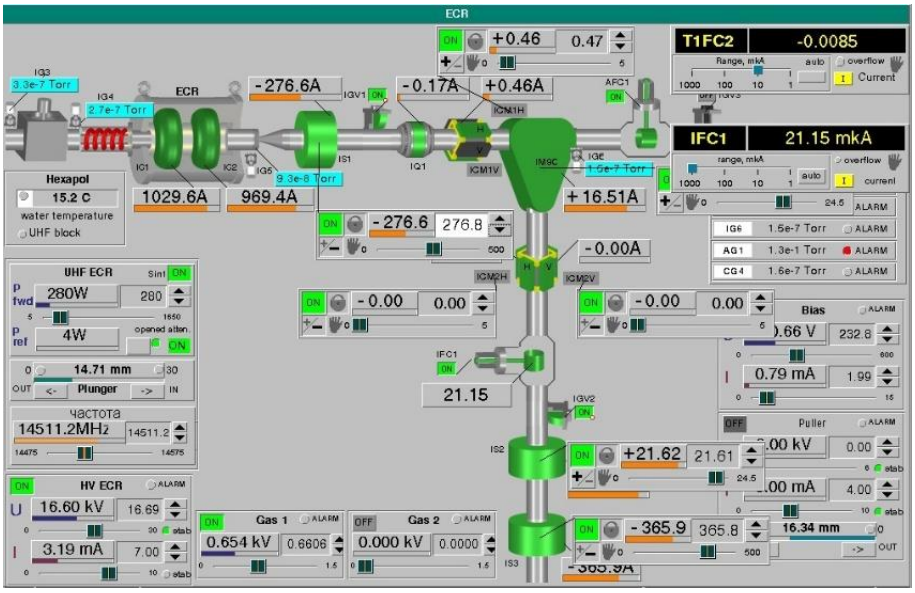


Рисунок 4. Система инжекции криптона на ускорителе ДЦ-60

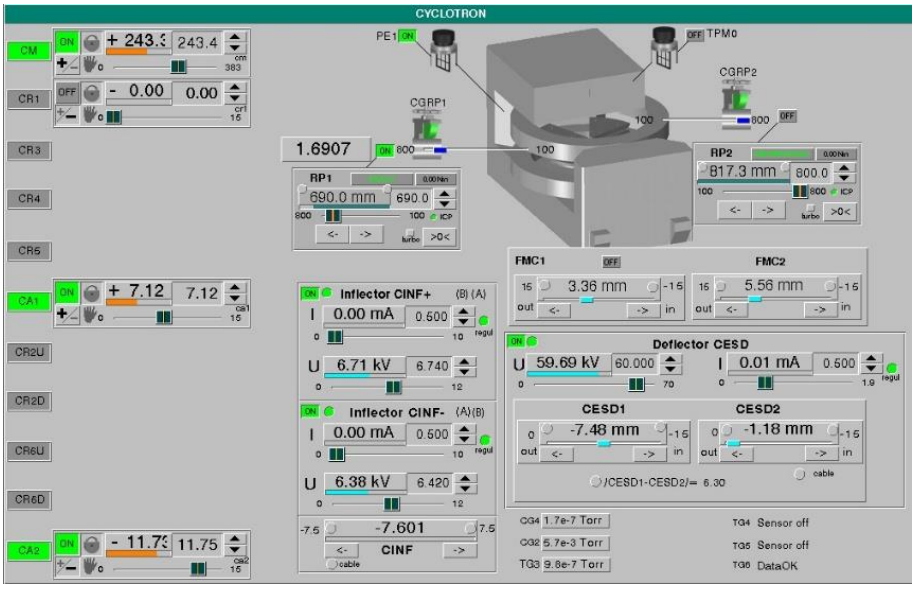


Рисунок 5. Режим ионно-оптических элементов электромагнита и системы вывода при ускорении и выводе пучка ионов криптона

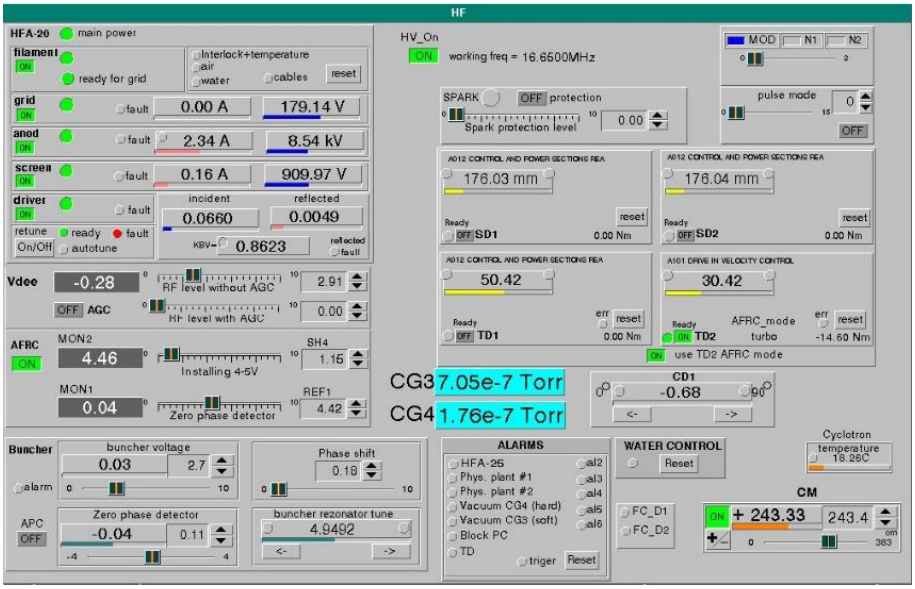


Рисунок 6. Параметры ВЧ-системы циклотрона ДЦ-60

Анализ коэффициента бегущей волны, который характеризует соотношение между бегущей (падающей) и отражённой волной в резонаторе [16], показал его значения в пределах 86–88.

Дополнительно была выполнена настройка банчера – устройства, обеспечивающего продольную фокусировку ионов перед их вводом в основную ускоряющую структуру [17]. Оптимальное значение напряжения банчера было выбрано на уровне 2,7, что способствовало увеличению плотности ионного пучка в 2–3 раза.

Вывод ионного пучка из ускорителя осуществлялся с использованием электростатического дефлектора, который обеспечивал отклонение заряженных частиц и их направление в транспортировочный канал. Для дальнейшего формирования и фокусировки пучка применялись стандартные ионно-оптические элементы, обеспечивающие его корректное прохождение через систему транспортировки [18].

Основными элементами данной системы являлись вертикальные и горизонтальные корректоры, используемые для компенсации отклонений траектории пучка, дублет квадруполей, отвечающий за фокусировку частиц, а также система сканирования пучка, позволяющая равномерно распределять ионы по заданной области эксперимента.

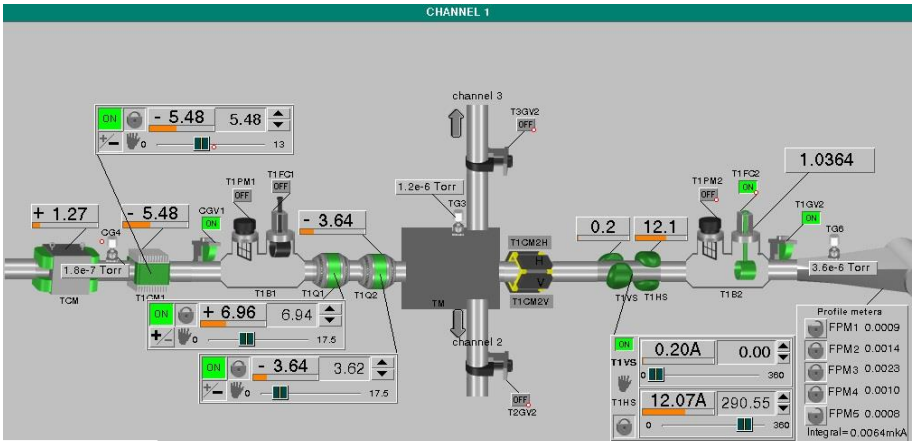


Рисунок 7. Настройка системы транспортировки канала T1

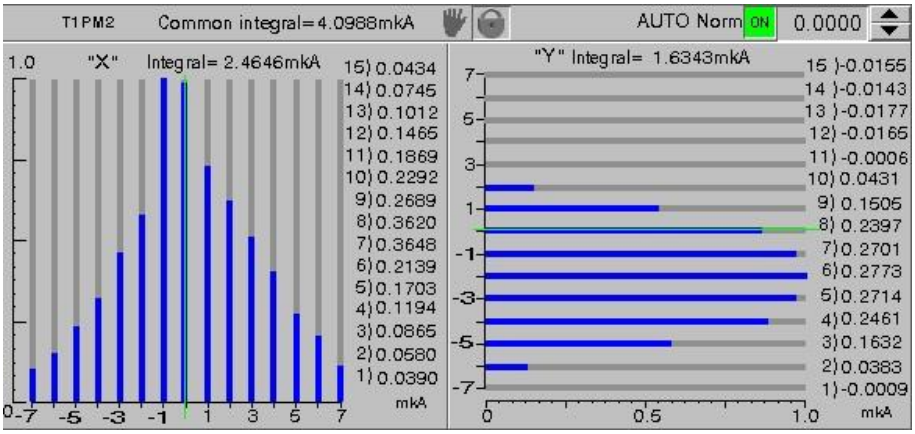


Рисунок 8. Профиль пучка на многоламельном пробнике и его распределение в сечении канала

Дуплет квадрупольных линз играет ключевую роль в формировании и управлении параметрами ионного пучка при его транспортировке. Эти линзы обеспечивают фокусировку пучка в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, позволяя сохранять его компактность и направленность на протяжении всего пути до мишени. В данном эксперименте настройки тока на квадрупольных линзах составили +6,94 А и −3,62 А соответственно, что обеспечило необходимую степень фокусировки и минимальные отклонения пучка от заданной траектории [19].

На завершающем этапе подготовки пучка к облучению, непосредственно перед мишенью, применялся электромагнитный сканер. Его задача заключалась в равномерном распределении ионов по поверхности облучаемого материала. Ток сканера по горизонтальному каналу составлял 12,07 А, что позволило сформировать требуемую геометрию пучка и добиться равномерности распределения плотности ионного пучка по всей площади плёнки.

На рисунке 8 представлен профиль ионного пучка, измеренный с помощью многоламельного пробника T1PM2. Этот тип диагностического оборудования позволяет получить детальное распределение интенсивности пучка по сечению канала, а также оценить его пространственное положение и симметрию.

В процессе настройки, параметры пучка были скорректированы таким образом, чтобы его форма, размер и положение соответствовали требуемым условиям облучения. Полученное распределение демонстрирует равномерность и стабильность пучка в рабочей зоне, что подтверждает корректную работу системы транспортировки и ионно-оптических элементов.

Первый канал, предназначенный для облучения полимерных плёнок, дополнительно оснащён профилометрами FPM 2, FPM 3, FPM 4 – специализированными диагностическими приборами, предназначенными для мониторинга параметров ионного пучка. Расположенные вблизи зоны облучения, профилометры обеспечивают высокоточный контроль пространственного положения, формы и направления пучка, как показано на рисунке 9, непосредственно перед попаданием на плёнку.

После оптимизации всех систем ускорителя ПЭТФ-плёнка подвергалась облучению тяжёлыми ионами криптона, в результате чего в её объёме формировались повреждённые треки. Последующее химическое травление в водном растворе гидроксида натрия (NaOH) приводило к избирательному растворению этих участков.

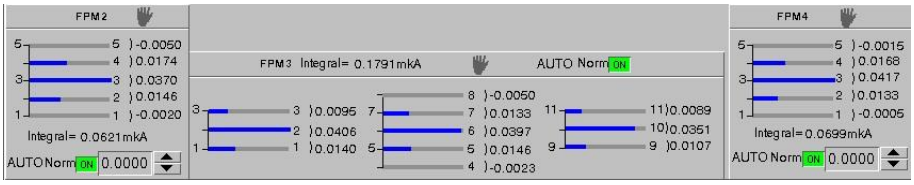


Рисунок 9. Профили пучка на FPM 2, FPM 3, FPM 4

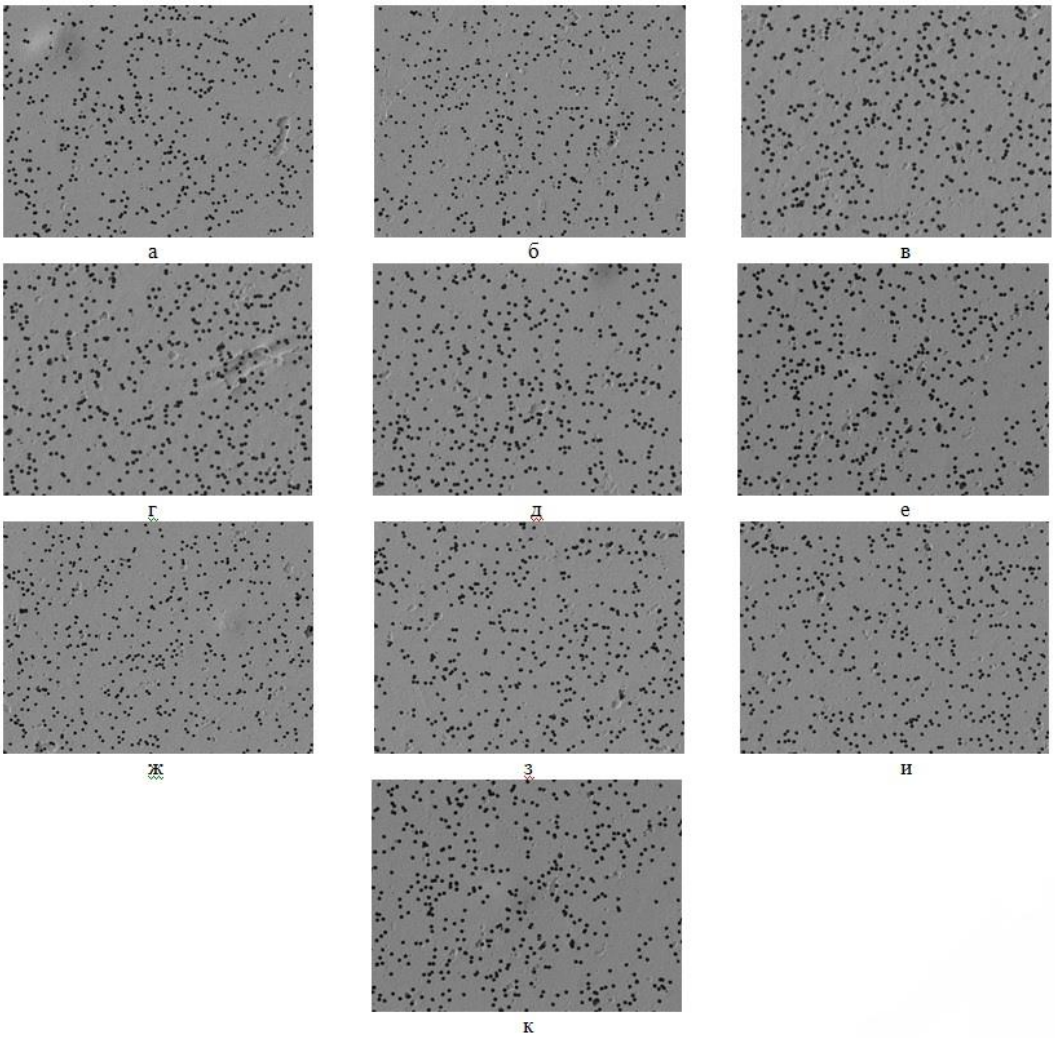


Рисунок 10. РЭМ-изображения в различных точках поверхности ПЭТФ-плёнки после ионного облучения и травления, подтверждающие равномерность морфологической картины (увеличение ×4000)

С целью обеспечения точности и воспроизводимости измерений, а также оценки однородности плотности плёнки, выборка осуществлялась в 10 равномерно распределённых точках. Ниже представлены изображения полученных образцов, выполненные с использованием растровой электронной микроскопии (РЭМ).

Заключение

В ходе выполненной работы был успешно реализован и настроен режим функционирования ускорительного комплекса ДЦ-60 для проведения облучения полиэтилентерефталатных (ПЭТФ) плёнок тяжёлыми ионами криптона. В процессе подготовки эксперимента была проведена оптимизация ключевых параметров ускорительной установки, включая систему инжекции, ВЧ-систему, ионно-оптические элементы основного электромагнита, систему вывода пучка, а также транспортную линию канала Т1.

Благодаря точной настройке всех подсистем обеспечена высокая стабильность ионного пучка, равномерность его распределения на мишени и соответствие параметров облучения требованиям поставленных исследовательских задач. Настроенный режим позволяет воспроизводимо модифицировать плёночные материалы, что имеет принципиальное значение для последующего анализа их

структурных, функциональных и радиационно-химических свойств.

В результате проведённых экспериментов было достигнуто устойчивое ускорение ионов криптона с зарядовым состоянием 15+ до энергии 1,75 МэВ/нуклон. Все системы ускорителя были полностью протестированы, а метод получения и формирования пучка криптона – успешно отработан.

Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования методик ионно-трековой модификации полимерных материалов как в фундаментальных исследованиях, так и в прикладных задачах, связанных с созданием функциональных микроструктур, фильтров, сенсоров и других элементов на основе ионно-модифицированных плёнок.

Финансирование

Данное исследование финансировалось Министерством энергетики Республики Казахстан (Программа BR23891530 «Развитие комплексных научных исследований в области ядерной и радиационной физики на базе казахстанских ускорительных комплексов»).

Литература / References

1. Zdorovets M., Ivanov I., Koloberdin M., Kozin S., Alexandrenko V., Sambaev E., Kurakhmedov A., Ryskulov A. Accelerator complex based on DC-60 cyclotron // Proceedings of the 24th Russian Particle Accelerator Conf. – Geneva: JACoW, 2014. – P. 287–289.
2. Mashentseva A. A., Sutekin D. S., Rakisheva S. R., Barsbay M. Composite Track-Etched Membranes: Synthesis and Multifaced Applications // Polymers. – 2024. – Vol. 16, No. 18. – P. 2616.
3. He Z.-B., Guo S.-L. Applications of Nuclear Track Membranes to Filtration of Medical Injections and Various Transfusions to Remove Solid Particles // Physics Procedia. – 2015. – Vol. 80. – P. 131–134.
4. Эфферентная терапия. Мембранный плазмаферез / Воинов В.А. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва: ОАО «Новости», – 2010. – 368 с. [Efferentnaya terapiya. Membrannyy plazmaferez / Voinov V.A. – 5-e izd., pererab. i dop. – Moskva: OAO “Novosti”, – 2010. – 368 p. (In Russ.)]
5. Максимова Е.В., Прокофьева Ю.В., Казанцева Н.Н., Почиталкина И.А. Применение трековых мембран для очистки воды из природных водоемов // Успехи в химии и химической технологии. – 2009. – Т. XXIII, №10 (103). – С. 37–41. [Maksimova E.B., Prokof'eva Yu.V., Kazantseva H.H., Pochitalkina I.A. Primenenie trekovykh membran dlya ochistki vody iz prirodnykh vodoemov // Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii. – 2009. – Vol. XXIII, No. 10 (103). – P. 37–41.]
6. Kros A., Nolte R. J. M., Sommerdijk N. A. J. M. Conducting Polymers with Confined Dimensions: Track-Etch Membranes for Amperometric Biosensor Applications // Adv. Mater. – 2002. – Vol. 14, No. 23. – P. 1779–1782.
7. Spohr R., Zet C., Eberhard Fischer B., Kiesewetter H., Apel P., Gunko I., Ohgai T., Westerberg L. Controlled fabrication of ion track nanowires and channels // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2010. – Vol. 268, No. 6. – P. 676–686.
8. Apel P.Yu. Track etching technique in membrane technology // Radiation Measurements. – 2001. – Vol. 34. – P. 559–566.
9. Митрофанов А.В., Апель П.Ю., Блонская И.В., Орелович О.Л. Дифракционные фильтры на основе полиамидных и полиэтилентерефталатных трековых мембран // Журнал технической физики. – 2006. – Т. 76, № 9. – С. 121–127. [Mitrofanov A.V., Apel' P.Yu., Blonskaya I.V., Orelovich O.L. Difraktsionnye fil'try na osnove poliamidnykh i polietilentereftalatnykh trekovykh membran // Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. – 2006. – Vol. 76, No. 9. – P. 121–127. (In Russ.)]
10. Алисиенок О., Лавицкая А., Шумская Е., Хорошко Л., Евсейчик М., Козловский А., Здоровец М., Канюков Е. ПЭТФ-мембраны, функционализированные наноразмерным диоксидом титана // Материалы Международной научно-технической конференции «Современные электрохимические технологии и оборудование – 2023». – Минск: БГТУ, 2023. – С. 56–58. [Alisienok O., Lavitskaya A., Shumskaya E., Khoroshko L., Evseychik M., Kozlovskiy A., Zdorovets M., Kanyukov E. PETF-membrany, funktsionalizirovannye nanorazmernym dioksidom titana // Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sovremennye elektrokhimicheskie tekhnologii i oborudovanie – 2023». – Minsk: BGTU, 2023. – P. 56–58. (In Russ.)]
11. Soto Espinoza S., Aguiar C., Richieri F., Grasselli M. Track-etched membrane as fluorescence-based pH biosensor // Reactive and Functional Polymers. – 2019. – Vol. 135. – P. 1–7.
12. Fischer B. E., Spohr R. Production and use of nuclear tracks: imprinting structure on solids // Rev. Mod. Phys. – 1983. – Vol. 55, No. 4. – P. 907–948.
13. Ziegler J. F., Ziegler M. D., Biersack J. P. SRIM – The stopping and range of ions in matter (2010) // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2010. – Vol. 268, No. 11–12. – P. 1818–1823.
14. Gikal B., Dmitriev S., Apel P., Bogomolov S., Borisov O., Buzmakov V., Gulbekyan G., Ivanenko I., Ivanov O., Itkis M., Kazarinov N., Kalagin I., Kolesov I., Papash A., Paschenko S., Tikhomirov A., Khabarov M. DC-60 heavy ion cyclotron complex: The first beams and project parameters // Phys. Part. Nuclei Lett. – 2008. – Vol. 5, No. 7. – P. 642–644.
15. Smirnov V., Vorozhtsov S., Wu X., Alt D., Blosser G., Horner G., Paquette J., Usher N., Vincent J., Neville Z. Experimental Validation of the Field and Beam Dynamics Simulations for a Superconducting Cyclotron // Phys. Part. Nuclei Lett. - 2020. - Vol. 17, No. 2. - P. 204–210.
16. Li P., Yin Z., Ji B., Zhang T., Zhao Z. Development of a low-level RF control system for PET cyclotron CYCIAE-14 // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2014. – Vol. 735. – P. 184–187.
17. Kalagin I., Gikal B., Gulbekyan G., Pchelkin N., Prokhorov S. Multigap and Polyharmonic Bunching Systems at FLNR Cyclotrons // Proceedings of the 25th Russian Particle Accelerator Conf. – Geneva: JACoW, 2017. – P. 447-449.

18. Brown T. A., Gillespie G. H. Optics elements for modeling electrostatic lenses and accelerator components: III. Electrostatic deflectors // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2000. – Vol. 172, No. 1–4. – P. 338–343.
19. Гикал Б. Н., Гульбекян Г. Г., Иванов, Г. Н., Иванова, И. Б., Казаринов, Н. Ю., Казача В. И., Калагин И. В., Колесов И. В., Лебедев Н. И., Мельников В. Н., Серобаба А. П., Фатеев А. А. Система транспортировки пучков тяжелых ионов, выведенных из циклотрона ДЦ-60. // Сообщение ОИЯИ Р9-2006-37. – 2006. – С. 7. [Gikal B. H., Gul'bekyan G. G., Ivanov, G. N., Ivanova, I. B., Kazarinov, N. Yu., Kazacha B. I., Kalagin I. B., Kolecov I. B., Lebedev H. I., Mel'nikov B. H., Cerobaba A. P., Fateev A. A. Cictema tpancpoptipovki puchkov tyazhelykh ionov, vyvedennykh iz tsiklotpona DTs-60 // Soobshchenie OIYaI R9-2006-37. – 2006. – P. 7.]

ПЭТФ ПЛЕНКАЛАРЫН АУЫР KR ИОНДАРЫМЕН СӘУЛЕЛЕНДІРУ ҮШІН ДЦ-60 ҮДЕТКІШ ПАРАМЕТРЛЕРІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

А. М. Темір[1], И. А. Иванов[1,2], М. В Колобердин[1], А. Д. Сапар[1,2], Д. А. Мустафин[1], Е. О. Унгарбаев[1], Е. В. Бихерт[1], Б. С. Аманжулов[1], А. С. Сейтбаев[1,2], С. С. Сембаев[1,2], И. К. Тлеубай[1,2]

[1] ҚР ЭМ «Ядролық физика институты» РМК, Алматы, Қазақстан
[2] Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

** Байланыс үшін E-mail: adilet.temir@mail.ru, adilettemir.kz@gmail.com*

Мақалада трек мембраналарын жасау үшін ауыр криптон иондарымен полиэтилентерефталат (ПЭТФ) пленкаларын сәулелендіру үшін ДЦ-60 циклотронының жұмыс режимін реттеу және оңтайландыру қарастырылады. Үдеткіштің баптау қадамдары, соның ішінде үдеткіш процесінің параметрлерін есептеу, сондай-ақ криптон плазмасын жасау үшін асқын жоғары жиілікті (микротолқынды) жүйені орнату сипатталған. Магнит тогы, инфлектор және дефлектор кернеулері, сондай-ақ үдеткіштен шығатын сәуленің сипаттамалары сияқты негізгі параметрлер қарастырылады. Сәулені тасымалдау және фокустау жүйесіне, сондай-ақ эксперименттердің қажетті дәлдігі мен жаңғыртылуына қол жеткізу үшін сәулелену жағдайларын оңтайландыруға ерекше назар аударылады. Алынған нәтижелер полимерлі материалдарды иондық-трек модификациялау әдістемелерін одан әрі дамыту және оларды әртүрлі технологиялық және коммерциялық салаларда қолдану үшін маңызды.

Түйін сөздер: *ауыр иондар, криптон, үдеткіш, пленка сәулеленуі, ПЭТФ.*

OPTIMIZATION OF THE DC-60 ACCELERATOR PARAMETERS FOR IRRADIATION OF PET FILMS WITH HEAVY Kr IONS

A. M. Temir[1*], I. A. Ivanov[1,2], M. V Koloberdin[1], A. D. Sapar[1,2], D. A. Mustafin[1], E. O. Ungarbaev[1], E. V. Bikhert[1], B. S. Amanzhulov[1], A. S. Seytbaev[1,2], S. S. Sembaev[1,2], I. K. Tleubay[1,2]

[1] RSE "Institute of Nuclear Physics" ME RK, Almaty, Kazakhstan
[2] L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

** E-mail for contacts: adilet.temir@mail.ru, adilettemir.kz@gmail.com*

This paper discusses the setup and optimization of the DC-60 cyclotron operating mode for irradiating polyethylene terephthalate (PET) films with heavy krypton ions to create track membranes. The stages of accelerator tuning are described, including calculations of acceleration parameters and the adjustment of the radio frequency (RF) system for krypton plasma generation. Key parameters are considered, such as magnet current, inflector and deflector voltages, and beam characteristics at the accelerator output. Special attention is given to the beam transport and focusing system, and the optimization of irradiation conditions to ensure the required accuracy and reproducibility of experiments. The results obtained are important for the further development of ion-track modification methods for polymer materials and their application in various technological and commercial fields.

Keywords: *heavy ions, krypton, accelerator, film irradiation, PET.*