

ОБЛУЧЕНИЕ ТРЕКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ В ПУЧКАХ ИОНОВ КСЕНОНА НА УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ NICA

А. А. Зайцев^{1,2,}, П. И. Зарубин^{1,2}, С. Д. Мурашко³,
Н. Маримутху¹, А. А. Сливин¹, Г. А. Филатов¹*

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

² Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва

³ Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова,
Белорусский государственный университет, Минск

Представлены результаты анализа твердотельных трековых детекторов CR-39 и пластинок ядерной фотоэмульсии, облученных в пучках ускоренных ионов ксенона с энергиями 3,2 МэВ/нуклон и 3,8 ГэВ/нуклон на ускорительном комплексе NICA.

The results of the analysis of CR39 solid-state track detectors and nuclear emulsion plates exposed to beams of accelerated xenon ions with energies of 3.2A MeV and 3.8A GeV at the NICA accelerator complex are presented.

PACS: 29.40.Rg; 29.40.Wk

ВВЕДЕНИЕ

Во время четвертого сеанса работы ускорительного комплекса NICA были впервые сгенерированы пучки ускоренных ионов ксенона. Было предложено применить относительно дешевый и гибкий метод фильмовой регистрации заряженных частиц с целью фотофакта наблюдения ускоренных пучков, а также проведения профилометрических измерений сформированных пучков. Образцы пластикового детектора CR-39 и пластинок ядерной фотоэмульсии были облучены в области инжекции пучка в бустер (испытательная станция СОЧИ — Станция Облучения ЧИпов) на выведенном пучке из нуклотрона в точке F3 и в экспериментальной зоне установки BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron).

РЕГИСТРАЦИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ МЕТОДОМ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ТРЕКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Метод твердотельных трековых детекторов (ТТТД) — один из методов профилометрии пучков заряженных ядерных фрагментов, основанный на использовании твердотельных материалов, способных реги-

* E-mail: zaicev@jinr.ru

стрировать следы проходящих через них ионов. При взаимодействии ионов с твердотельным материалом образуются треки, расположение и форма которых зависят от энергии, типа ионов и угла падения. Изменяя параметры треков на поверхности твердотельного детектора, можно получить информацию о пространственном и зарядовом распределении ионов в поперечном сечении моноэнергетического пучка [1, 2].

Метод ТТТД имеет некоторые преимущества перед другими методами профилометрии, такие как высокое пространственное разрешение, отсутствие мертвого времени детектора и эффективность регистрации. Это обосновывает возможность использования ТТТД для контроля плотности, положения и интегральной интенсивности пучка тяжелых релятивистских ионов. Одним из образцов ТТТД является пластический мономер аллилдигликолькарбонат (АДК), имеющий коммерческое название CR-39 (Columbia Resin № 39). CR-39 представляет собой прозрачный жесткий пластик плотностью около $1,30 \text{ г/см}^3$. Этот материал является одним из наиболее чувствительных ТТТД и может напрямую регистрировать энергичные протоны, альфа-частицы и более тяжелые ядра [1, 2].

Тяжелый ион, проходя через материал CR-39, вызывает радиационное повреждение молекулярных соединений, образуя при этом скрытый трек. Для наблюдения треков с помощью оптической микроскопии необходимо увеличить их путем химического травления детектора. Типичными химическими травителями для CR-39 являются растворы NaOH и KOH. Концентрация и температура травителя, а также время травления выбираются с учетом выполненного облучения (зависимость энергии и заряда частиц и их полного потока через образец). При химическом травлении область радиационного повреждения вещества детектора разрушается быстрее, чем неповрежденная область. В результате эрозии скрытого трека в материале детектора появляется коническая вытравленная ямка, которая может быть хорошо различима под оптическим микроскопом (рис. 1).

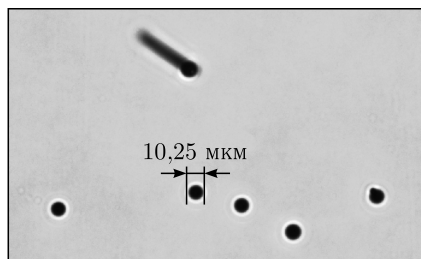


Рис. 1. Увеличенное изображение образца ТТТД CR-39, облученного в пучке ионов $^{124}\text{Xe}^{+28}$ с энергией 3,2 МэВ/нуклон. В нижней части рисунка видны отдельные треки входящих ионов под прямым углом к плоскости детектора в виде черных кругов размером порядка 10 мкм. Верхний трек соответствует иону, вошедшему под углом к плоскости детектора

Чувствительность регистрации треков определяется относительной скоростью травления поврежденного участка и зависит от ионизационных потерь энергии частицы в материале. Для ТТТД CR-39 минимальная линейная передача энергии, при которой происходит образование треков, составляет около 3 кэВ/мкм [3].

АНАЛИЗ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ТРЕКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ CR-39

Облучение образцов CR-39 проводилось в экспериментальной зоне установки BM@N во время четвертого пусконаладочного сеанса работы комплекса NICA. Энергия пучка ядер $^{124}\text{Xe}^{+54}$ составляла 3,85 ГэВ/нуклон, интегральная загрузка детектора — 5 сбросов с полным потоком порядка 10^6 ионов. Образцы CR-39 располагались между катодно-стриповой камерой и калориметром, при этом нормаль к поверхности CR-39 совпадала с направлением первичного пучка. Исследуемый детектор CR-39 изначально представлял собой пластину размером 50×50 мм и толщиной 1 мм. После облучения образец CR-39 травился в водном растворе с концентрацией NaOH 6 моль/л. Все образцы во время травления находились в термостате, поддерживающем температуру $(85,0 \pm 0,1)^\circ\text{C}$. Время травления составило 20 мин.

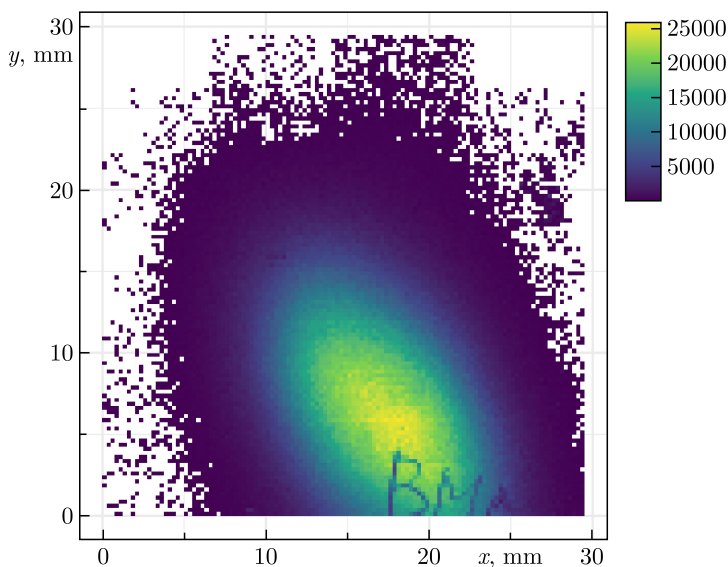


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Пространственное распределение входящих треков ядер ксенона в образец ТТТД CR-39, облученный в пучке ядер ксенона. В нижней части рисунка виден артефакт «BMN», что является маркировкой на поверхности образца ТТТД. Цветом показана интенсивность входящих треков ионов ксенона в отсканированном образце CR-39

Сканирование протравленных образцов осуществлялось с помощью моторизованного микроскопа Olympus BX63 с использованием фирменного программного обеспечения Olympus cellSens для получения панорамных изображений в автоматическом режиме с картами точного позиционирования оптического фокуса на поверхность препарата. В рамках этой программы осуществлялось автоматическое распознавание образов треков на панорамном изображении. При облучении угол падения ионов Хе был близок к перпендикулярному, в результате чего формировались треки, имеющие примерно круглую форму. Чтобы оптимизировать время ручной оцифровки, поверхность сканировалась объективом с 40-кратным увеличением с помощью функции автоматического сшивания панорамных изображений с использованием карты фокуса. Пространственное распределение входящих треков показано на рис. 2. Основная область пучка (ядро) имеет эллиптическую форму с наклоном эллипса около 45° в плоскости XY . Эллипс пучка, внутри которого плотность треков превышает 10^3 мм^{-2} , имеет размеры большой и малой полуосей порядка 16 и 8 мм соответственно.

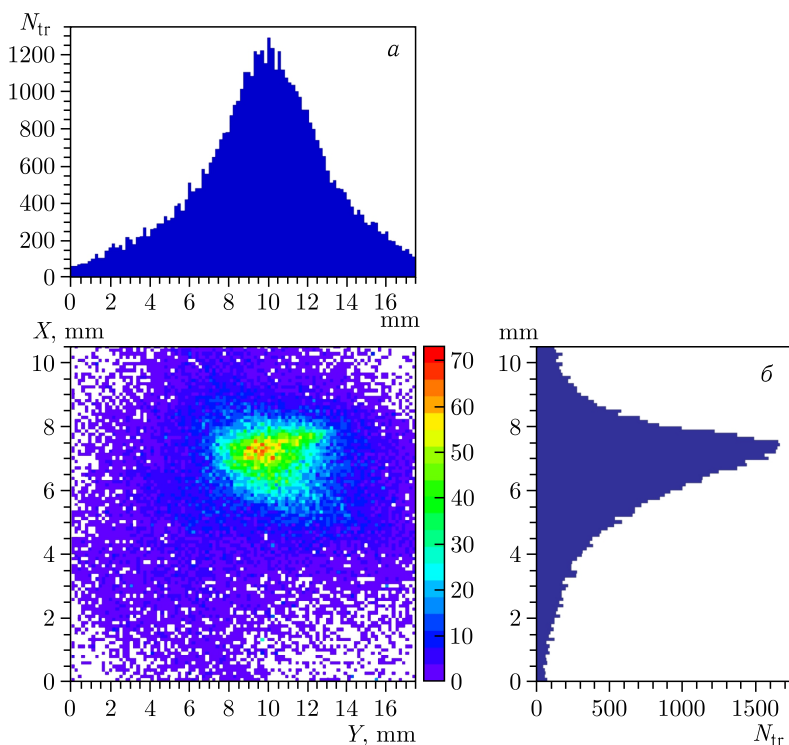


Рис. 3. Распределение входящих треков сфокусированного пучка ионов ксенона по поверхности образца CR-39. Вставки: а) проекция на ось Y , б) проекция на ось X

Прослеживание положения входа и выхода треков ядер ксенона из объема образца (толщиной 1 мм) позволило вычислить угол поворота пучка, который составил $\theta = (2,57 \pm 0,12)^\circ$ относительно нормали к поверхности образца.

Благодаря гибкости методики стало возможным проведение опытного облучения пластиковых образцов CR-39 и пленок ПЭТФ (полиэтилентерефталат) в низкоэнергетичных пучках ионов ксенона (3,2 МэВ/нуклон) в вакуумной камере станции СОЧИ [4]. Облучение образцов проводилось в различных условиях с переменным интегральным потоком и фокусировкой пучка. На рис. 3 представлено распределение входящих треков в образец ТТТД CR-39 в случае сфокусированного пучка ионов ксенона в одном цикле сброса.

ОБЛУЧЕНИЕ ПЛАСТИНОК ЯДЕРНОЙ ФОТОЭМУЛЬСИИ В ПУЧКАХ ЯДЕР КСЕНОНА С ЭНЕРГИЕЙ 3,8 ГэВ/НУКЛОН

Пластинки с ядерной фотоэмульсией (ЯЭ) облучались в измерительном павильоне в фокусе F3 на участке транспортного канала (нуклотрон – корпус 205). При облучении стопок ЯЭ в фокусе F3 с целью равномерной загрузки ЯЭ по всей ширине были выключены линзы ЗК100 и 4К100. Ориентация стопок ЯЭ выбиралась вдоль пучка для продольного облучения. Стопки состояли из 10 опытных слоев. Каждый слой

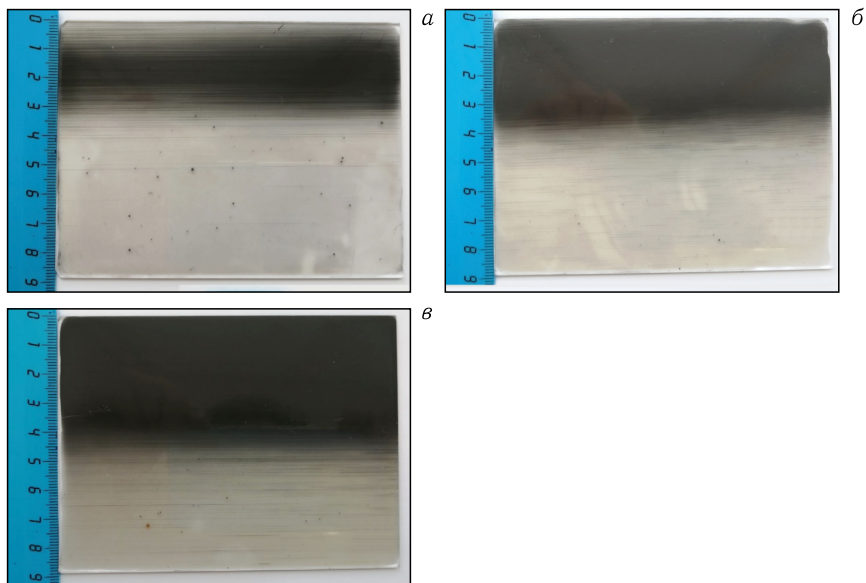


Рис. 4. Изображение облученных пластинок ЯЭ в точке F3 в 1 (а), 5 (б) и 25 (в) циклах сброса пучка ускоренных ядер ксенона

представляет собой стеклянную основу размерами 9×12 см и толщиной 2 мм, на которую полит чувствительный слой ЯЭ толщиной 100 мкм. Число циклов сброса составило 1, 5 и 25 на стопку с интегральным потоком частиц за сброс $\sim 10^6$. Проявленные пластинки представлены на рис. 4. Оптимальной по плотности треков ядер ксенона в объеме ЯЭ оказалась стопка с одним циклом сброса.

Второе облучение проводилось в экспериментальной зоне установки VM@N [5] между катодно-стриповой камерой и адронным калориметром. Облучение проходило в режиме «target OUT» в месте прохождения пучка, отклоненного дипольным анализирующим магнитом СП41 (номинальное поле в полюсе магнита 8,5 кГс). Облучение проведено в одном цикле сброса пучка ядер ксенона с энергией 3,8 ГэВ/нуклон. На рис. 5 представлено увеличенное изображение пластинки ЯЭ, где отчетливо визуализируются треки ядер ксенона. На рис. 6 приведено изображение периферического взаимодействия налетающего ядра ксенона с тяжелой компонентой из состава ЯЭ с множественным образованием вторичных заряженных фрагментов ядра-снаряда. События периферических взаимодействий ядер в ЯЭ идентифицируются наблюдением узкой струи фрагментов, ориентированных в направлении оси первичного ядра при отсутствии треков фрагментов ядра-мишени и рожденных в области вершины столкновения ядер. При визуальном просмотре облученной пластинки видны следы сильноионизирующих релятивистских частиц, сопровождаемых шлейфом следов дельта-электронов, которые могут быть отнесены к следам ксенона.

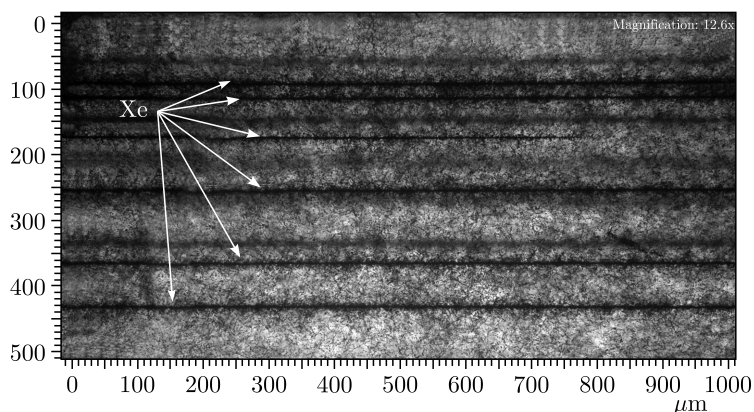


Рис. 5. Увеличенное изображение слоя ЯЭ, облученной в пучке релятивистских ядер ксенона в точке F3. Отчетливо визуализируются отдельные треки ядер с высокой плотностью образованных δ -электронов вдоль треков. Для масштаба приведены шкалы по осям X-Y. Изображение получено на моторизованном микроскопе Olympus BX63 с объективом 20 $\times$

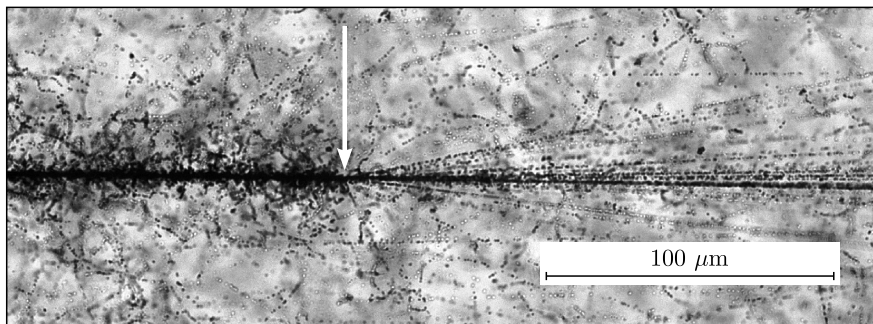


Рис. 6. Макрофотография периферического взаимодействия ядра ксенона в ядерной эмульсии, полученная через 40-кратный объектив микроскопа Olympus BX63. В левой части рисунка отчетливо виден трек ядра ксенона с образованной вдоль трека «шубой» δ -электронов. Стрелкой указано положение вершины взаимодействия налетающего ядра с последующим образованием вторичных фрагментов, ограниченных конусом с углом 20°

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью твердотельных трековых детекторов CR-39 были восстановлены профили и интенсивности низкоэнергетических пучков ионов ксенона ($^{124}\text{Xe}^{+28}$), выведенных из инжектора на станцию СОЧИ. Проведены профилометрические измерения выведенных пучков релятивистских ядер ксенона ($^{124}\text{Xe}^{+54}$) в точке F3 на участке канала транспортировки и в области экспериментальной установки BM@N. Полученный таким образом уникальный экспериментальный материал станет основой для анализа множественных состояний α -частиц и нуклонов при оптимальной энергии налетающего ядра в рамках эксперимента BECQUEREL (BEryllium Clustering QUEst in RELativistic multifragmentation [6]).

Благодарности. Авторы выражают благодарность Е. М. Сыресину за организацию и помощь в проведении облучения образцов ТТТД CR-39 в пучке ионов ксенона на станции СОЧИ, С. М. Пиядину и С. Ю. Анисимову за предоставленную возможность облучения опытных слоев ядерной фотоэмульсии в пучках релятивистских ядер ксенона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пикуз С. А. (мл.), Скобелев И. Ю., Фаенов А. Я., Лавриненко Я. С., Беляев В. С., Ключников В. Ю., Матафонов А. П., Русецкий А. С., Рязанцев С. Н., Бахмутова А. В. // Теплофизика высоких температур. 2016. Т. 54, № 3. С. 453–474.
2. Jadrníčková I., Spurný F., Molokanov A. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2008. V. 5. P. 531–537.

3. Kodaira S., Yasuda N., Kawashima H., Kurano M., Hasebe N., Doke T., Ota S., Ogura K. // *Radiat. Meas.* 2009. V. 44, No. 9–10. P. 861–864.
4. Филатов Г. А., Сливин А. А., Сыресин Е. М., Бутенко А. В., Ворожцов А. С., Агапов А. В., Шипулин К. Н., Колесников С. Ю., Карпинский В. Н., Кузнецов М. И., Киров С. В., Сергеев А. В., Галимов А. Р., Тихомиров А. М., Тюлькин В. И., Леткин Д. С., Леушин Д. О., Тузиков А. В. // *Письма в ЭЧАЯ.* 2022. Т. 19, № 5(244). С. 412–417.
5. Mamatov M. (BM@N Collab.) // *Phys. At. Nucl.* 2023. V. 86, No. 6. P. 1346–1353.
6. Эксперимент BECQUEREL. becquerel.jinr.ru.