

Применение твердотельных трековых детекторов для измерения содержания сверхмалых количеств альфа-излучателей

С.Г. Горбачев

Научно-исследовательский институт радиационной защиты Академии технологических наук Украины, Киев

В статье рассмотрен подход к спектрометрии α -частиц с использованием твердотельных трековых детекторов типа CR-39 в энергетическом диапазоне 4–6 МэВ. Описаны этапы получения экспериментальной информации от облучения твердотельных трековых детекторов до его травления с последующим анализом отдельных треков. Представлены результаты измерений образцов, которые содержат изотопы плутония, а также зависимость минимально детектируемой активности от времени экспозиции и активности метки для одного из нуклидов.

Ключевые слова: твердотельные трековые детекторы, пассивные детекторы, CR-39, обработка изображений треков, травление детекторов.

Твердотельные трековые детекторы (ТТД) имеют существенные преимущества перед многими ядерными детекторами активного типа (таких, которые используют электронное оборудование): точное определение координат частиц, возможность селекции по типу заряженных частиц, абсолютная нечувствительность к сопутствующему γ -излучению, малый собственный фон, возможность проведения долговременных измерений, отсутствие необходимости использования электроники во время экспонирования опытных образцов. Такие детекторы экономичны, легки (несколько граммов), имеют долговременную стабильность, негигроскопические и относятся к типу устройств пассивного накопления. К недостаткам нужно отнести сложность оптической обработки изображений на поверхности ТТД.

В последние годы наблюдается значительный прогресс в технологии сбора информации от ТТД с использованием оптических автоматизированных комплексов, которые включают в себя оптический микроскоп, сканирующую платформу, видеокамеру и компьютер. При ручной обработке очень тяжело определять характеристики тысяч, иногда и десятков тысяч треков ядерных частиц. Поэтому для автоматизированной обработки информации с ТТД необходимо использование изображений структуры поверхности протравленных детекторов, оцифрованных из микроскопа. Изображения треков, полученные при сканировании микроскопом, из видеокамеры оцифровываются и пересылаются к компьютеру. Компьютерный анализ позволяет определить параметры изображений каждого трека. Такая компьютеризация создает предпосылки для качественно новых применений ТТД.

Метод представляет собой многостадийный процесс: предварительное травление – облучение опытным образцом – основное травление – оптическое сканирование поверхности – компьютерная обработка результатов сканирования. Поиск и анализ отдельных треков основан на измерении диаметра конца протравленного трека и минорной оси. Для распознавания изображений треков, полученных с использованием оптического микроскопа, применяется искусственная нейронная сеть. Процедура обработки (сканирование) поверхности протравлен-

ных детекторов была адаптирована к оптическим сканирующим системам на базе микроскопов Olympus BX60 и Carl Zeiss и соответствующих моторизованных платформ. При долговременных измерениях ТТД может рассматриваться как детектор «параллельного типа» – регистрация (фиксация) событий радиоактивного распада отделена от их последующего анализа. При пакетной обработке нескольких десятков детекторов типичное время обработки одного детектора составляет 60–120 минут, тогда как время экспонирования может составлять несколько месяцев. Эта особенность позволяет организовывать долговременные измерения одновременно для десятков-сотен детекторов с использованием лишь одной системы обработки детекторов. Использование ТТД для регистрации α -частиц дает возможность определения их энергии пробега посредством анализа формы отдельных протравленных треков.

Несмотря на значительные достижения в этом направлении, до сих пор остаются открытыми вопросы о корректной оценке флюенса излучения, энергетической разрешающей способности метода и влиянии на нее систем сбора и обработки информации. В данной работе представлены результаты измерения содержания α -излучающих изотопов плутония чернобыльского происхождения на уровне менее 1 мБк в образцах. Приводятся результаты измерений опытных образцов, которые имели содержание отдельных изотопов плутония-238, 239, 242 с активностью в диапазоне 10^{-5} – 10^{-3} Бк, в количестве 40–50 штук измерялись со временем экспонирования от 7 до 75 дней. Уровень фона составлял 3–6 треков на месяц в энергетическом интервале 4,8–5,5 МэВ. МДА для изотопов плутония 238, 239 при отсутствии метки (плутония-242) и длительности измерений – 2 месяца – составил $5 \cdot 10^{-5}$ Бк. В наиболее низкоактивных образцах проводилась процедура отбраковки треков, образованных при распаде тория-228 и радия-226 (кластеров треков), что позволило уменьшить влияние этих изотопов в 3–4 раза. Получено хорошее согласие с измерениями активности с использованием полупроводниковых детекторов.

С помощью оптического микроскопа можно определить следующие параметры XY-проекции (вид сверху): большую

M и малую m ось трека, большую ось ротовой горловины L , диаметр d закругляет конец трека (рис. 1).

На языке MATLAB было создано программное обеспечение, которое идентифицировало изображение и определяло все параметры трека.

Большим значением энергии E соответствуют большие пробеги R . Большим пробегам R соответствуют меньшие значения диаметров протравленных треков d . В координатах (m, d) это соответствует горизонтальным локусам (рис. 2). Уменьшение малой оси m в пределах локуса соответствует увеличению величины угла входа альфа-частицы в тело детектора (относительно нормали к поверхности).

На двумерном распределении (m, d) можно провести энергетические изолинии, которые позволяют провести превращение этого распределения в энергетический и подсчитать количество отсчетов в соответствующих зонах, для каждого изотопа плутония (рис. 3).

ТТД позволяют определять, кроме геометрических параметров, характеризующих отдельные треки, также глобальные координаты расположения треков на поверхности детектора и направление движения альфа-частицы, которая входит в тело детектора (рис. 4). Это позволяет выделить две области: 1) облученную опытным образцом; 2) необлученную. Вторую область можно использовать для оценки вклада фоновых треков.

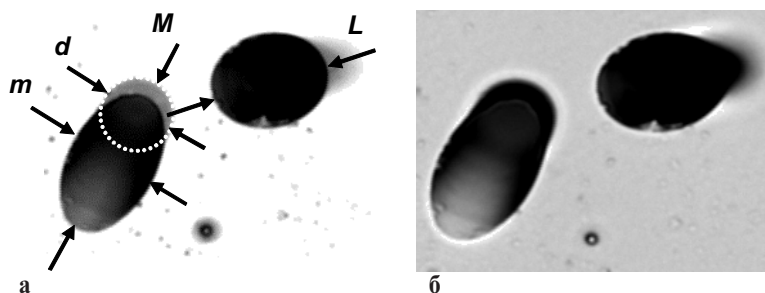


Рис. 1. Изображение протравленных треков для двух режимов работы микроскопа: а – режим проходящих лучей; б – режим отраженных лучей

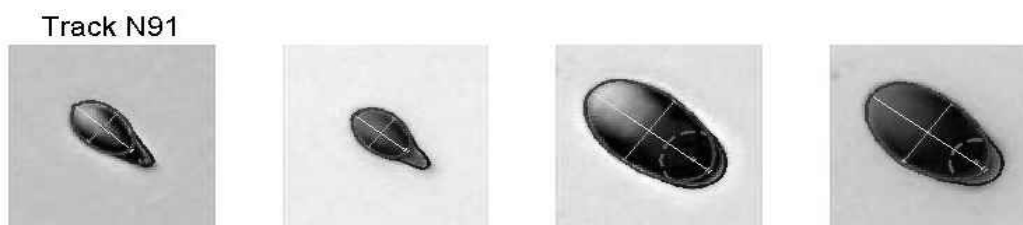


Рис. 2. Автоматическое определение параметров трека с использованием программного обеспечения

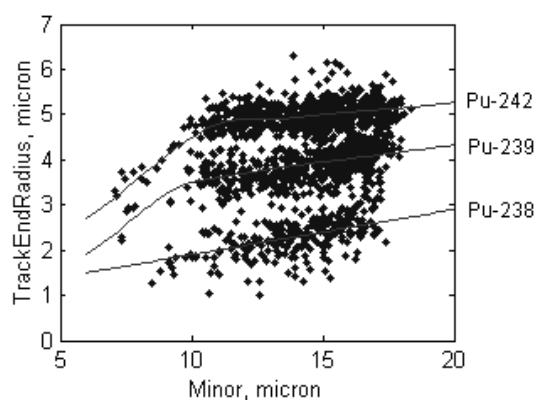


Рис. 3. Двухмерный график распределения треков в зависимости от диаметра закругления конца трека d и малой оси m для альфа-источника, который содержит изотопы ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{242}Pu

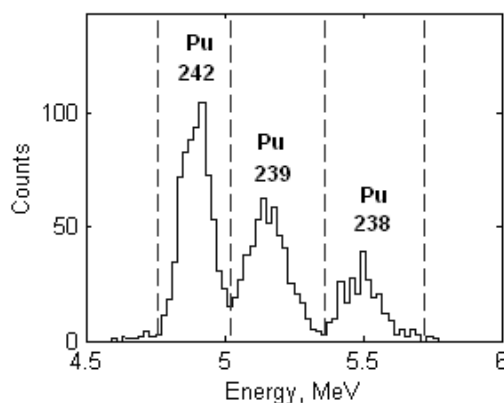


Рис. 4. Энергетическое распределение обработанных треков. Выделено три зоны, которые соответствуют разным изотопам плутония

ТТД относятся к пассивным детекторам накопительного типа. Длительное сохранение таких детекторов к проведению процедуры облучения ведет к накоплению определенного количества треков. Для нивелирования влияния таких треков при измерениях сверхнизких активностей предлагаемая методика использует стадию предварительного травления. Это позволяет при обработке поверхностей облученных и протравленных детекторов с использованием оптических микроскопов проводить простой отбор таких треков. Чувствительность к координатам и направлениям движения позволяет отбрасывать некоторую часть фоновых треков, образованных во время облучения и расположенных в пределах области 1, то есть там где проявляется общее влияние как радионуклидов образца, так и фонового радона. Распад одного ядра Rn-222 (радона) или Rn-220 (торона) сопровождается вылетом трех альфа-частиц в течение короткого времени (что значительно меньше времени облучения). Вылет этих альфа-частиц – изотропен. Существует вероятность того, что две (или даже все три частицы) полетят в направлении на детектор, что приведет к образованию треков, которые за формой практически не будут отличаться от частиц источника. Однако, существование общего центра вылета будет однозначно интерпретировать эту совокупность треков как фоновая (рис. 5). Вероятность того, что такие треки могут образоваться путем облучения опытным образцом – чрезвычайно мала.

Оценка уровня фона при измерениях трех изотопов плутония дает величину $\sim 0.05\text{--}0.1$ трек/день/см² для каждого энергетического интервала, это дает 1–2 фо-

новых треков при 20-дневной экспозиции для каждого изотопа.

На рисунке 6 представлены результаты оценки МДА для изотопа плутония-239 при разном времени измерений (от 1 до 100 дней) и активности плутония-242 (метки) (от 0 до 4 мБк).

На рисунке 7 представлены типичные спектры, полученные при обработке одной группы детекторов (обработанных в идентичных условиях) с разным содержанием изотопов плутония-238, плутония-239, плутония-242 в сравнении с результатами, полученными с использованием ППД для этих образцов.

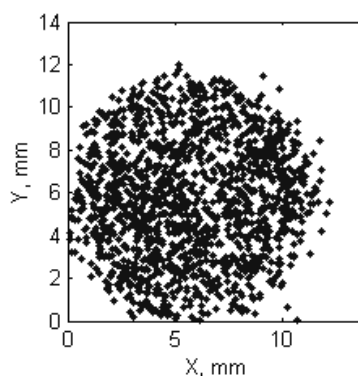


Рис. 5. Глобальные координаты расположения треков на поверхности детектора

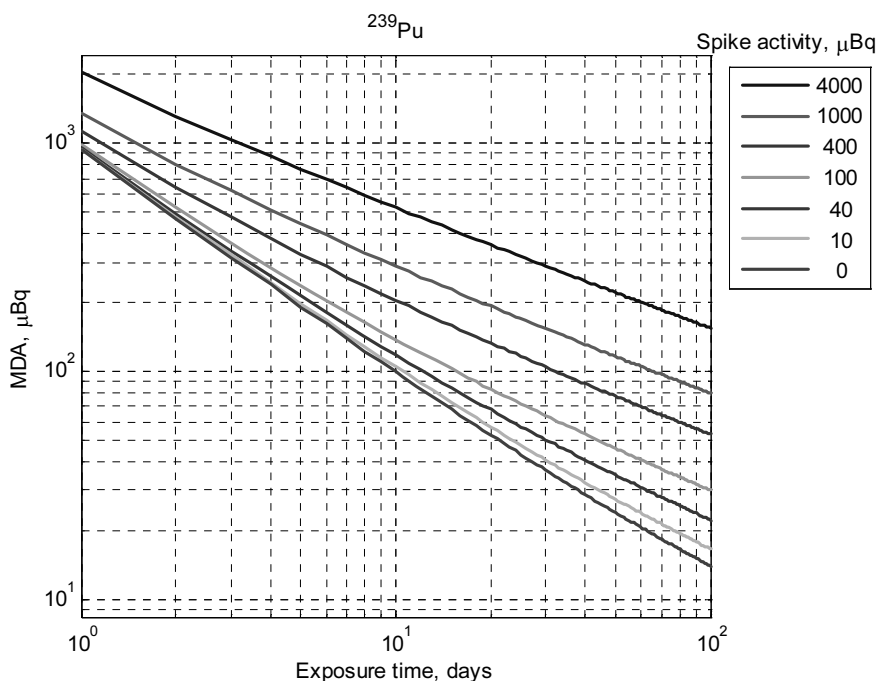


Рис. 6. Зависимость МДА от времени экспозиции и активности метки

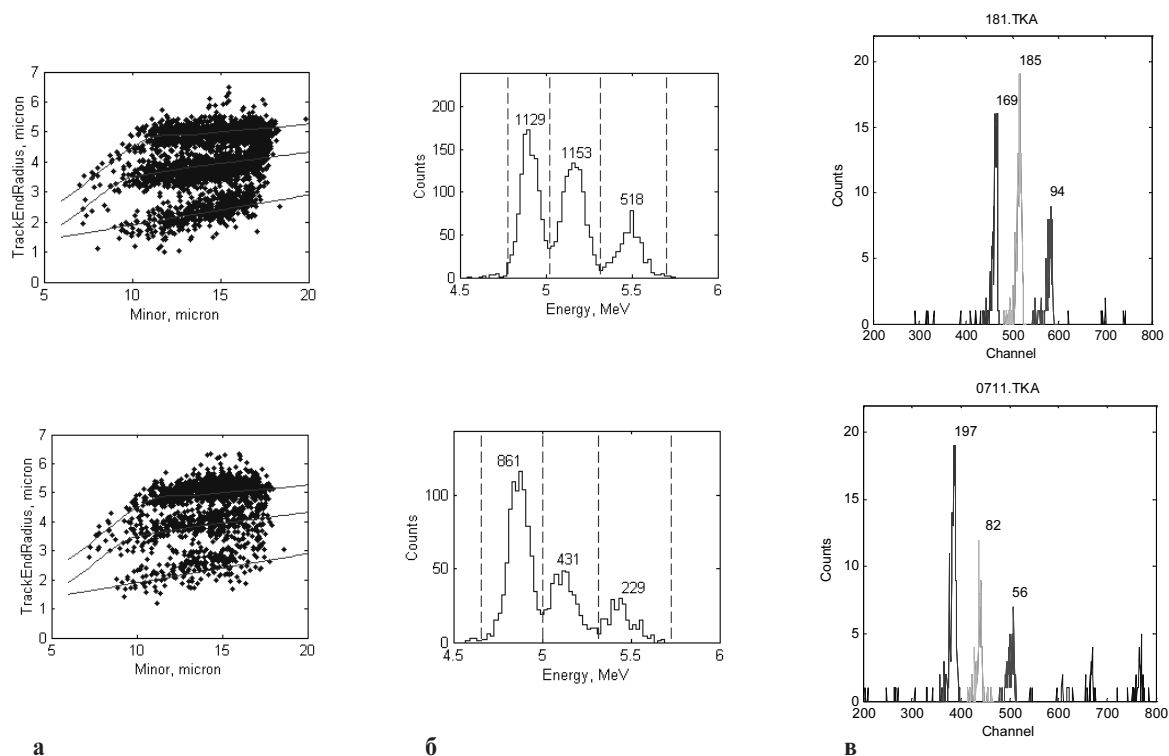


Рис. 7. Типичные спектры полученные с использованием ТТД (а, б) и ППД (в) для образцов с разным относительным содержанием изотопов плутония. Время экспозиции: 21 день – для ТТД; 2 дня – для ППД

Литература

1. Нормы радиационной безопасности Украины (НРБУ – 97). Киев, 1997. 121 с.
2. Горн Л.С., Хазанов Б.И. Избирательные радиометры. М.: Атомиздат, 1975. 376 с.
3. Горн Л.С., Хазанов Б.И. Современные приборы для измерения ионизирующих излучений. М.: Энергоатомиздат, 1989. 232 с.
4. Дементьев В.А. Измерение малых активностей радиоактивных препаратов. М.: Атомиздат, 1967. 140 с.
5. Брегадзе Ю.И., Степанов Э.К., Ярына В.П. Прикладная метрология ионизирующих излучений. М.: Энергоатомиздат, 1990. 264 с.
6. Fewes AP., Fully automated image analysis of etched tracks in CR-39 // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B, 1992. Vol. 71. P. 465.
7. Gammage R., Espinosa G. Digital imaging system for track measurements // Radiat. Measur, 1997. Vol. 28. P. 835.

S.G. Gorbachev

Application of solid-state track detectors for measurement of the low-level activity of alpha-emitters

Radiation Protection Institute of Academy of Technological Sciences of Ukraine, Kyiv

Abstract. Alpha spectrometry approach using solid state nuclear track detectors of CR-39 type is considered within the energy range 4–6 MeV. Experimental information obtaining stages are described from solid state nuclear track detectors irradiation procedure to follow analysis of individual tracks. Results of plutonium isotopes contained samples and dependence of minimal detectable activity from exposure time and spike (tracer) activity for nuclide are presented.

Key words: Solid-state nuclear detecto, passive detectors, CR-39, processing images of tracks, irradiation procedure, MDA.

Поступила 29.12.2008 г.

С.Г. Горбачев
Тел: (8-10-380-44) 483-35-02;
E-mail: zorg@rpi.kiev.ua