ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.08

ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОР НА ОСНОВЕ МИКРОКАНАЛЬНЫХ ПЛАСТИН ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ НА УСТАНОВКЕ MABP

© 2023 г. Д. Азнабаев[a,b *], Т. Исатаев[a,b], С. М. Лукьянов[a], В. И. Смирнов[a], С. С. Стукалов[a], А. Н. Солодов[a]

[a]*Объединенный Институт Ядерных Исследований,*

Россия, 141980, Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, д.6

[b]*Институт Ядерной Физики*

Казахстан, 050032, Алматы, ул. Ибрагимова, 1

[*]*email: daur_is101@jinr.ru*

Поступила в редакцию 15.03.2023 г.

После доработки 08.05. 2023 г.

Принята к публикации 25.06.2023 г.

Представлены результаты измерений осколков деления с помощью времяпролетной системы с позиционно-чувствительным детектором на основе микроканальных пластин, созданной для измерений масс продуктов ядерных реакций на установке MABP. Преимуществом таких микроканальных пластин является их высокая позиционная чувствительность и высокая эффективность регистрации тяжелых заряженных частиц с малой энергией. В работе приведены техническое описание системы регистрации осколков деления и результаты измерения параметров позиционно-чувствительного детектора на основе микроканальных пластин большой площади (40×60 мм^2), полученные при измерении осколков спонтанного деления ^{252}Cf. Координатное разрешение по осям *X* и *Y* определялось при регистрации осколков деления в реакции ^{14}N+^{192}Au на установке MABP. Временное разрешение ПЧД было получено путем регистрации времени пролета альфа-частиц, испускаемых радиоактивным источником ^{226}Ra.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее важных фундаментальных свойств атомного ядра является его масса. В экспериментальной ядерной физике был достигнут высокий уровень регистрации как стабильных, так экзотических ядер. При этом, если во многих случаях может быть достигнута эффективность регистрации близкая к 100%, для области экзотических ядер, находящихся далеко от линии β-стабильности, точные измерения масс сильно ограничены их низкими

скоростями образования и коротким периодом полураспада. Используются различные методы измерения масс продуктов ядерных реакций [1]. Точное измерение масс проводится при помощи магнитных масс-спектрометров – приборов, которые разделяют движущиеся ионы в пространстве. Для разделения заряженных частиц в масс-спектрометрах используется магнитное поле. При этом частицы в зависимости от их массы m и заряда q движутся по окружностям соответствующего радиуса R.

Другим широко распространенным методом масс-спектрометрии является определение масс и энергий продуктов реакции измерением их времени пролета (TOF, time of flight). Метод TOF [2, 3] позволяет измерять энергию регистрируемого ядра E_k по времени t, за которое ядро преодолевает фиксированное расстояние внутри времяпролетного спектрометра:

$$t = 72.3L\sqrt{\frac{A}{E_k}}, \qquad (1)$$

где A [а.е.м.] – массовое число частицы, L [м] – длина пролетной базы.

Эффективно используются времяпролетные системы при регистрации осколков деления тяжелых ядер [4]. При этом регистрирующие датчики должны иметь хорошие временные характеристики, так как точность измерения масс атомных ядер в TOF-методе в основном обеспечивается энергетическим и временным разрешением спектрометра. Для получения хорошего разрешения по массам необходимо иметь временное разрешение лучше 250 псек. Из них может быть определено массовое разрешение:

$$\left(\frac{\delta M}{M}\right)^2 = \left(\frac{\delta E_k}{E_k}\right)^2 + 4\left(\frac{\delta t}{t}\right)^2, \qquad (2)$$

где M – масса частицы, E_k – ее кинетическая энергия и t – время пролета.

В последнее время важную роль в подобных исследованиях играют детекторы, в которых регистрируется координата попавшей в детектор частицы − так называемые позиционно-чувствительные детекторы (ПЧД) [5]. В результате использования таких детекторных установок в ядерно-физических экспериментах был получен ряд весьма интересных результатов в различных областях исследований. Преимущество ПЧД особенно ярко проявляется в реакциях с экзотическими ядрами, когда исследуются редкие события. В экспериментах по измерению времени пролета необходимо реконструировать траекторию продуктов реакции. По этой причине нами был разработан детектор, чувствительный к позиции эмиссии электронов, используемый для восстановления траектории с низкими потерями энергии и высокой эффективностью.

Ниже описывается специальная времяпролетная система, используемая в экспериментах на магнитном анализаторе высокого разрешения − установке МАВР Лаборатории ядерных

реакций ОИЯИ [6−8], позволяющая измерять продукты ядерных реакций с высоким разрешением по их массе.

Одной из физических задач, решаемых с помощью анализатора МАВР, является исследование нового процесса, обнаруженного в ЛЯР ОИЯИ, − эмиссии заряженных частиц максимально возможной энергии (вблизи кинематического предела для двухтельного механизма реакции). В результате такого процесса образуется тяжелое “холодное” ядро-остаток, которое после вылета быстрой частицы может поделиться. Изучить характеристики делящегося ядра-остатка позволяют созданные специально для этого анализатора времяпролетные системы, описанию которых посвящена настоящая работа. К используемой в этой установке времяпролетной системе предъявляются особые требования. Во-первых, она должна работать при больших загрузках (до 10^5 $с^{-1}$), связанными с высокой интенсивностью пучка ионов на мишени (до 10^{11} $с^{-1}$). Во-вторых, должна быть малочувствительна к излучению из мишени (электроны, гамма, нейтроны). В-третьих, обладать высокой эффективностью регистрации и позиционной чувствительностью для восстановления траектории частиц. Всем этим условиям отвечает разработанная и используемая времяпролетная система, описываемая ниже. На рис. 1 представлена схема эксперимента на МАВР.

2. ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОР НА ОСНОВЕ МИКРОКАНАЛЬНЫХ ПЛАСТИН

Позиционно-чувствительными называют детекторы, которые позволяют определить координату места попадания в них заряженных частиц или квантов рентгеновского излучения.

Для достижения высокого позиционного разрешения в данной работе был выбран позиционно-чувствительный детектор на основе микроканальных пластин (МКП). Детектор состоит из лавсановой фольги размером 70×50 $мм^2$ и толщиной 140 $мкг/см^2$ с золотым напылением, толщиной 20 $мкг/см^2$, ускоряющей сетки, электростатического зеркала (медно-бериллиевая проволока диаметром 50 мкм), шевронной сборки двух МКП-пластин размером 60×40 $мм^2$ толщиной 1 мм, координатной системы из двух ортогональных линий задержки. Каждая линия задержки имеет змеевидную форму и изготовлена из медноберрилиевого провода диаметром 100 мкм. Линии задержки намотаны на капролоновые винты с шагом 0.5 мм, укрепленные на стальной отражающей плате. Диаметр винтов для линии задержки *y*-координаты 3 мм, а *x*-координаты − 5 мм.

На рис.2 представлен использованный в работе позиционно-чувствительный детектор:

На ПЧД подается общее напряжение 2650 В через высоковольтный источник питания (ORTEC MODEL 556). Далее через высоковольтные делители напряжение последовательно распределяется между первой МКП − 900 В, второй МКП − 700 В, а также координатной

системой, конверсионной фольгой и сеткой электростатического зеркала с необходимыми потенциалами.

Принцип работы детектора основан на выбивании электронов регистрируемой частицей при прохождении через фольгу. Выбитые электроны ускоряются электрическим полем в пространстве между фольгой и ускоряющей сеткой. На шевронную сборку МКП электроны попадают, отклонившись от сетки электростатического зеркала на 90°. Независимо от прохождения частицы через входную фольгу, траектории электронов имеют одну и ту же длину за счет конструкции электростатического зеркала, поэтому выходной временной сигнал детектора является позиционно независимым. Потенциалы на линиях задержек подобраны таким образом, чтобы электроны, вылетающие из МКП, собирались только на одной из них. Вторая линия задержки, на которой не собираются электроны, служит для компенсации наводок быстрого временного сигнала с выходной поверхности МКП.

Пластины изготавливаются из свинцового стекла толщиной 0.5–1 мм и представляют собой порядка 10^6 электронных умножителей: стеклянные каналы диаметром около 10 мкм, упорядоченные в сотовые структуры (рис.4). Электроны, попадая внутрь каналов с сопротивлением до 10^6 Ом, выбивают с их поверхности вторичные электроны. Многократное повторение этого процесса приводит к возникновению электронной лавины на выходе из канала с усилением сигнала примерно в 10^7 [9].

Система измерения координат регистрируемых частиц состояла из вакуумной камеры, системы сбора данных, программного обеспечения и следующих блоков электроники (рис.5):

1) Высоковольтный источник питания (ORTEC MODEL 556 HIGH VOLTAGE POWER SUPPLY),
3) Дискриминатор (QUAD Constant Fraction Discriminator-200 MHz),
4) Время-амплитудный преобразователь (Ortec),
5) Система набора данных (Mesytec, MDPP-16, MVLC).

Сигналы с анода и координатные сигналы подаются на дискриминаторы (CFD) со следящим порогом (см рис. 6). Далее выходной логический сигнал с дискриминатора (анода) идет на “старт” TAC (время-амплитудный преобразователь), а координатные сигналы *X*, *Y* задерживаются таким образом, чтобы они приходили на схему совпадений всегда позже стартовых сигналов и подаются на “стоп” (TAC). Далее сигнал поступает на импульсно-цифравой преобразователь (MDPP-16). Данные, полученные со всех модулей, передаются в крейт-контроллер (MVLC) и накапливаются в системе набора данных (DAQ) с помощью высокоскоростного USB3.0 интерфейса. Запуск системы набора осуществляется с логического сигнала анода МКП-детектора (MVLC-trigger). Затем в программе набираются спектры

событий, которые сохраняются в виде бинарных файлов. Файлы конвертируются в ROOT-формат для дальнейшего анализа.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Для измерения координат регистрируемых частиц были проведены измерения осколков спонтанного деления ^{252}Cf. Перед ПЧД была закреплена маска размером 69 × 59 мм^2, толщиной 1 мм с 24 отверстиями: по 6 отверстий по оси X шириной 3 мм, по 4 отверстия по оси Y шириной 3.5 мм. Шаг между отверстиями составил 5 мм. Источник был установлен перед ПЧД с маской таким образом, чтобы излучение попадало на всю поверхность маски, установленной перед входным окном детектора. Расстояние между маской и источником излучения составило 20 см, а между маской и входным окном − 1 см.

Схематический вид маски показан на рис. 7. На рис.7**б** представлен измеренный двумерный координатный спектр, соответствующий отверстиям маски.

Для координаты X было измерено FWHM=3.4 мм, для координаты Y – FWHM=3.2 мм. При тестировании детектора источником ^{252}Cf были получены координатные разрешения: для координаты X – 1.4 мм для координаты Y − 1.1 мм и построены координатные спектры (рис.8):

Эффективность детектора для источника ^{252}Cf составила – 95%. Эта эффективность определяется “прозрачностью” используемых сеток. Перемещение электронов к детектору осуществляется с помощью однородного магнитного поля или электростатического зеркала таким образом, чтобы получить одинаковые по длине траектории, т. е. изохронно. Такой метод обеспечивает 100-процентную эффективность регистрации осколков деления.

Для определения временного разрешения ПЧД были проведены измерения времени пролета альфа-частиц с известными энергиями E_{α_1}=7.6 МэВ, E_{α_2}= 6 МэВ, E_{α_3}= 5.4 МэВ, E_{α_4}= 4.8 МэВ, испускаемых радиоактивным источником ^{226}Ra. В данном случае в качестве детектора для регистрации сигнала “Старт”, с которого начинается отчет времени пролета электрона, выбитого заряженной частицей, был выбран МКП-детектор (рис.9). “Стоп”-сигнал регистрировался с анода ПЧД. Пролетная база между двумя детекторами составила 250 мм.

Стартовый МКП-детектор [10] состоит из конверсионной фольги размером 25×35мм^2, ускоряющей сетки, электростатического зеркала, сборки микроканальных пластин диаметром 32 мм (рис.10).

В результате измерений времени пролета альфа-частиц было получено хорошее временное разрешение 200 пс, представленное на рис.11.

Эксперимент проводился на пучках ионов ^{14}N с энергией 120 МэВ на циклотроне У-400 ЛЯР, ОИЯИ. Интенсивность пучка ^{14}N составляла 30 нА. Пучок выводился на мишень ^{197}Au толщиной d=2 мкм под углом 45°. Времяпролетный спектрометр был расположен под углом

85° к реакционной камере и состоял из стартового ПЧД на основе микроканальных пластин размером 40×60 мм^2, маски, закрепленной перед ПЧД для определения координат регистрируемых частиц и стопового Si-детектора размером 50×50 мм^2. Расстояние от мишени до МКП – 310 мм, пролетная база между МКП-детектором и Si-детектором – 230 мм. Телесный угол составил 27 мср.

В результате реакции ^{14}N+^{197}Au с ПЧД были получены координаты зарегистрированных частиц (рис.12).

Для координаты *X* было измерено FWHM=4.36 мм, для координаты *Y* – FWHM=3.4 мм. Получены значения эффективности регистрации продуктов реакций с помощью этого детектора близкие к 100% для всех масс продуктов. Разрешение для координаты *X* составило 1.6 мм для координаты *Y* – 1.4 мм. Построенные координатные спектры представлены на рис.12, 13.

4. ВЫВОДЫ

В данной работе были проведены измерения характеристик позиционно-чувствительного детектора на основе микроканальных пластин и создана времяпролетная система с параметрами высокой точности: временным разрешением и позиционной чувствительностью. В экспериментах по измерению осколков спонтанного деления ^{252}Cf и осколков деления в результате реакции ^{14}N+^{192}Au получены позиционное разрешения по координатам *X* и *Y*. Временное разрешение детектора получено при измерении времени пролета альфа-частиц, испускаемых ^{226}Ra, от стартового МКП-детектора до стопового ПЧД-детектора. Результаты измерений демонстрируют возможность использования ПЧД-детектора на основе микроканальных пластин в различных ядерно-физических экспериментах, где необходимо измерять скорость и массу образующихся продуктов ядерных реакций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тарантин Н.И.* // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1995. Т. 26. №. 4. С. 1046.
2. *Рыбаков Б.В., Сидоров В.А.* Спектрометрия быстрых нейтронов. Приложение № 1 к журналу Атомная энергия. Москва: Атомиздат, 1958.
3. *Веников Н.И., Чумаков Н.И.* // Атомная энергия. 1964. Т.17. №. 6. С. 503.
4. *Гангрский Ю.П., Марков Б.Н., Перелыгин В.П.* Регистрация и спектрометрия осколков деления. Москва: Энергоатомиздат, 1992. ISBN 5-283-03972-2.
5. *Andersson H.* Position sensitive detectors: device technology and applications in spectroscopy. Дисс. Institutionen för informationsteknologi och medier. 2008.
6. *Voskoboinik E.I., Kazacha V.I., Kolesov I.V., Lukyanov S.M., Maslov V.A., Melnikov V.N., Osipov N. F., Penionzhkevich Yu.E., Skobelev N.K., Sobolev Yu.G.* High-resolution magnetic analyzer MAVR. Preprint JINR. 2013. E13. 1. http://www1.jinr.ru/Preprints/2013/001(E13-2013-1).pdf
7. *Maslov V.A., Zernyshkin V.A., Penionzhkevich Yu.E., Kolesov I.V., Tarasov O.B.* // Eurasian J. Phys. Functional Mater. 2019. V. 3(1). P. 24.
   DOI: http://dx.doi.org/10.29317/ejpfm.2019030103
8. *Maslov V.A., Kazacha V.I., Kolesov I.V., Lukyanov S.M., Melnikov V.N., Osipov N.F., Penionzhkevich Yu. E., Skobelev N.K., Sobolev Yu.G., Voskoboinik E. I.* // Proceed. IASEN. 2013. World Scientific, P.103.
9. *Дмитриев В.Д., Лукьянов С.М., Пенионжкевич Ю.Э., Саттаров Д.К.* // ПТЭ. 1982. № 2. С.7. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/12/605/12605623.pdf
10. *Азнабаев Д., Смирнов В.И., Исатов А., Мендибаев К., Исатаев Т.*// Письма в ЭЧАЯ. 2019. Т. 16. № 6(225). С. 620. https://doi.org/10.1134/S1547477119060372

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ:

Рис. 1. Схема времяпролетного спектрометра, присоединенного к реакционной камере на МАВР.

Рис. 2. Позиционно-чувствительный детектор на основе МКП.

Рис. 3. Схема работы ПЧД.

Рис. 4. Структура микроканальной пластины.

Рис. 5. Времяпролетный спектрометр и система сбора данных.

Рис. 6. Блок-схема электроники системы сбора данных.

Рис. 7. а) Схематический вид маски. **б**) Двумерный спектр в координатах *X* и *Y*, полученный в результате калибровки детектора источником ^{252}Cf.

Рис. 8. Одномерные спектры в координатах *X* и *Y*, полученные в результате калибровки детектора источником ^{252}Cf: спектр по оси координат *X* (**а**), спектр по оси координат *Y* (**б**).

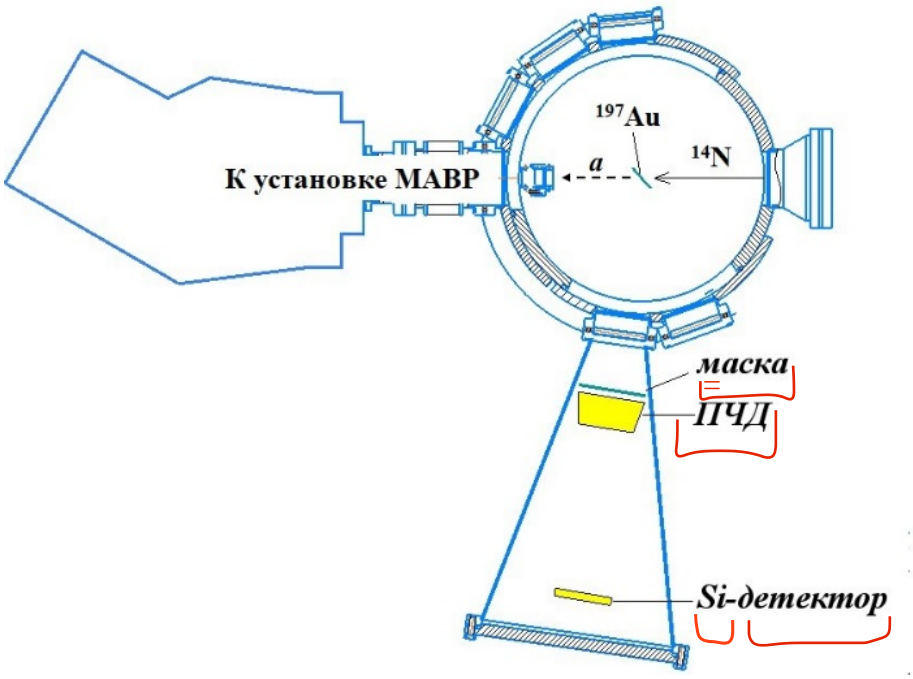
Рис. 9 Схема расположения источника ^{226}Ra и детекторов.

Рис. 10. Стартовый детектор на основе МКП.

Рис. 11. Временное распределение альфа-частиц, испущенных ^{226}Ra.

Рис. 12. Двумерный спектр в координатах *X*, *Y* реакции ^{14}N+^{197}Au.

Рис. 13. Одномерные спектры в координатах *X* и *Y*, полученные в реакции ^{14}N+^{197}Au: спектр по оси координат *X* (**а**), спектр по оси координат Y (**б**).



прямо

Рис. 1

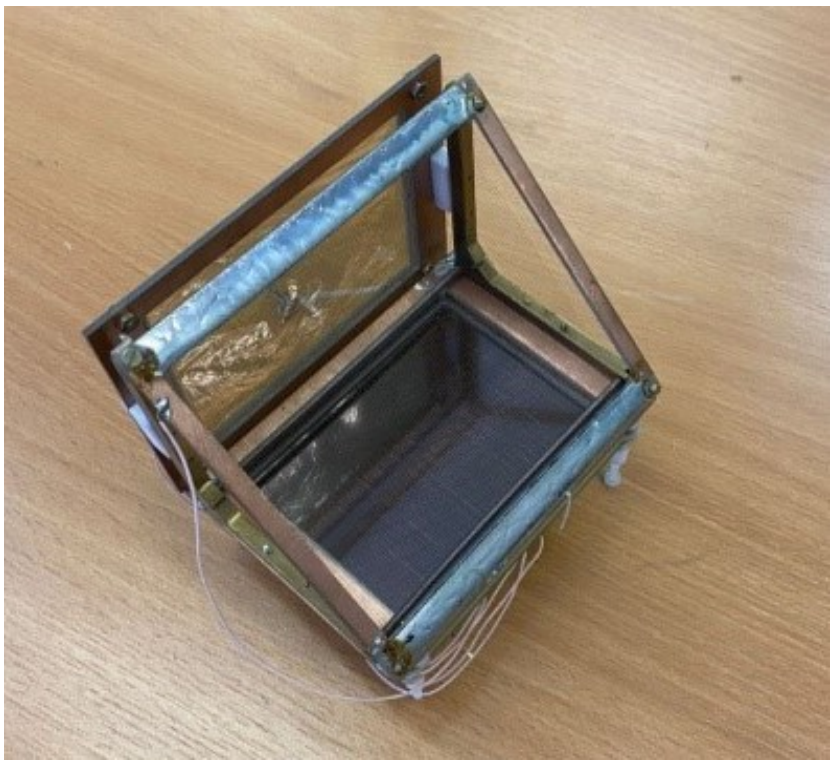
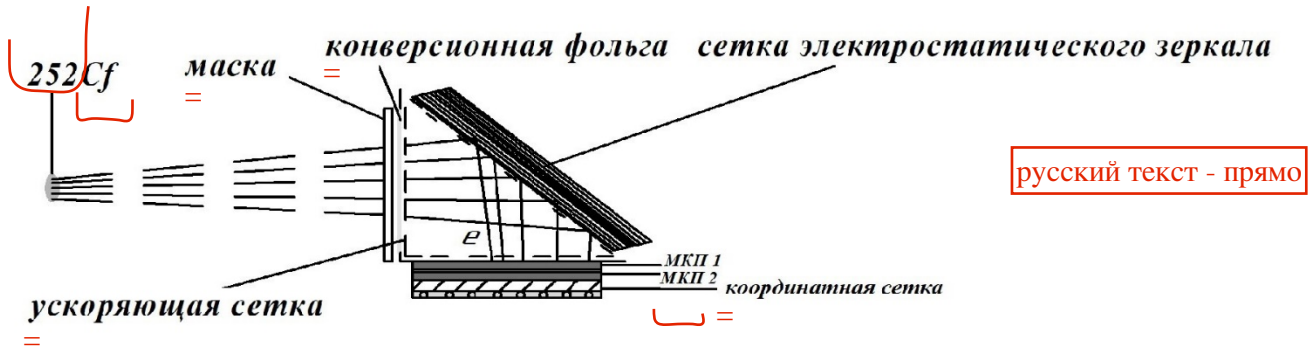


Рис. 2

252Cf



русский текст - прямо

Рис. 3

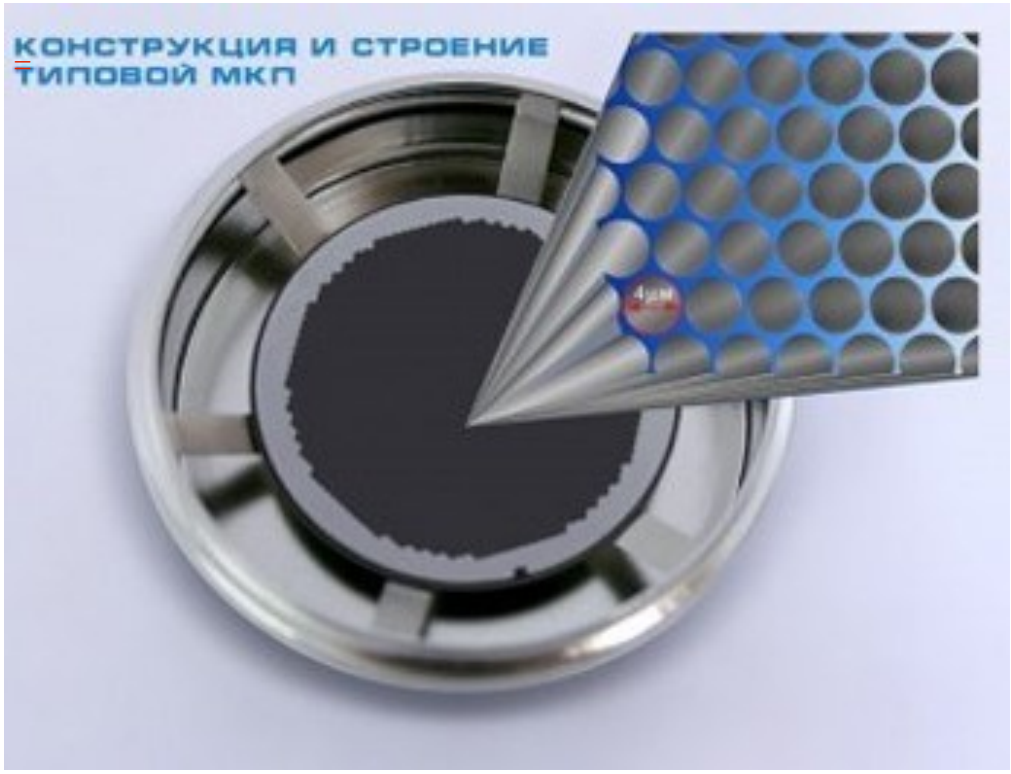


Рис. 4

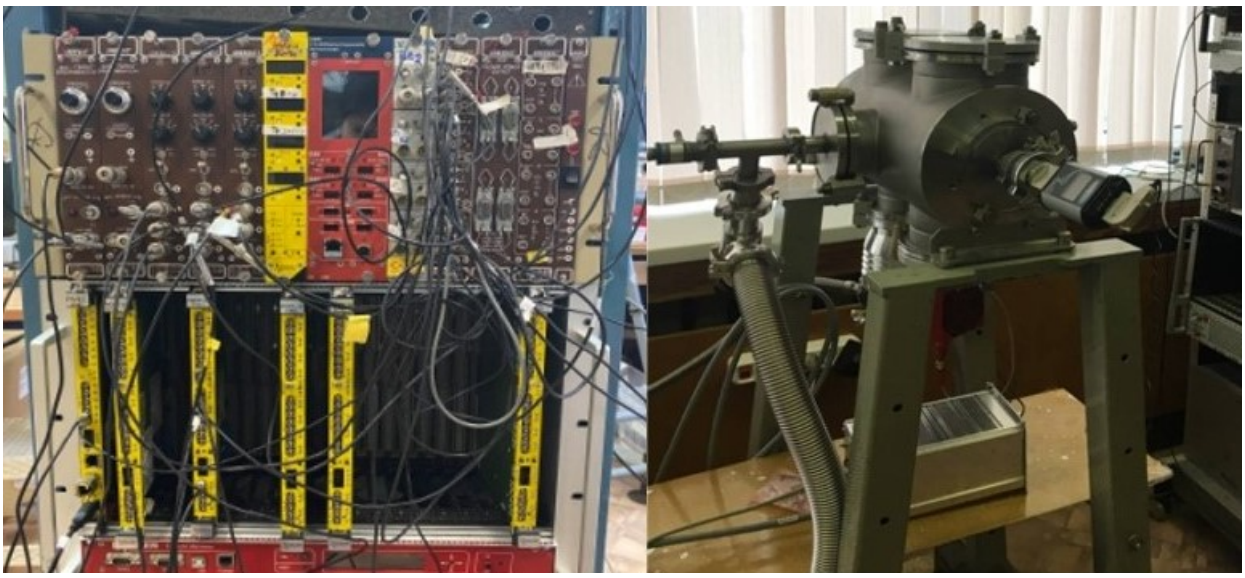


Рис. 5

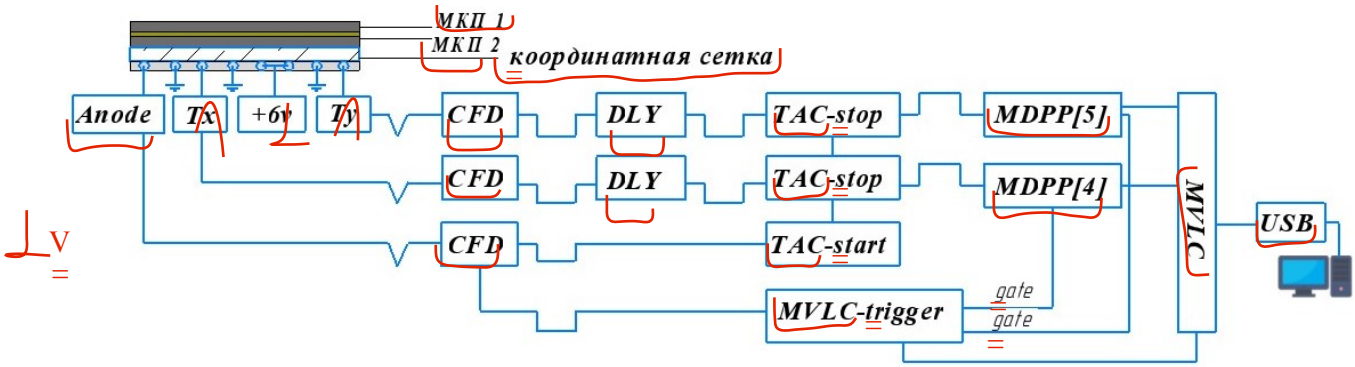
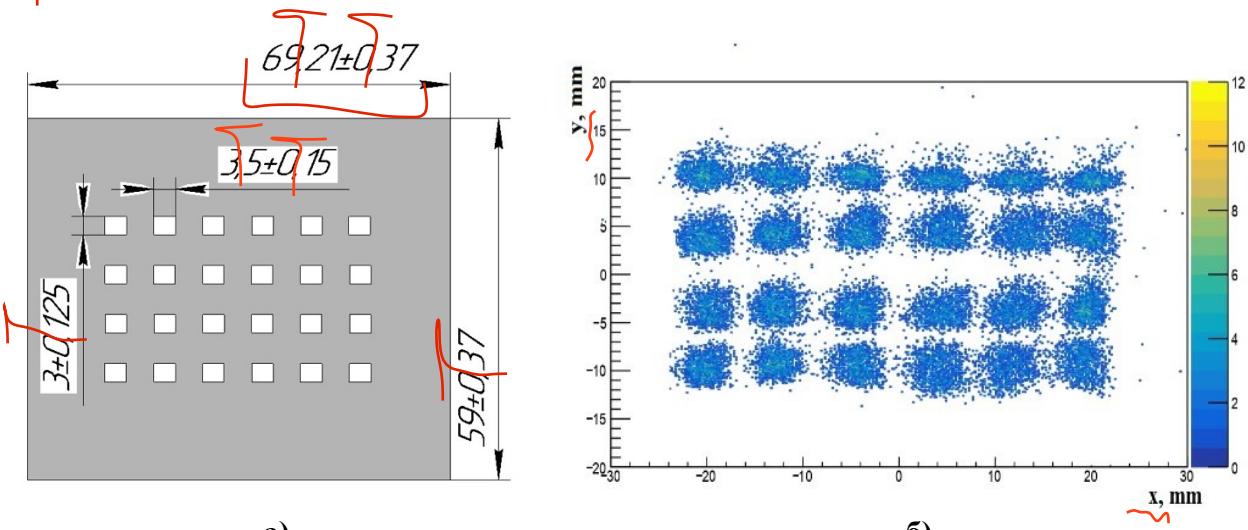

МКП 1
МКП 2
координатная сетка
Anode
Tx
+6v
Ty
CFD
CFD
CFD
DLY
DLY
TAC-stop
TAC-stop
TAC-start
MVLC-trigger
MDPP[5]
MDPP[4]
gate
gate
MVLC
USB
V

Рис. 6

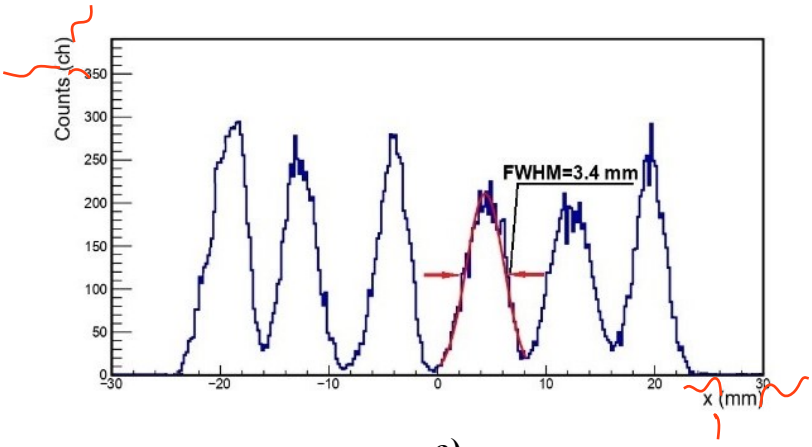
точка, 6 раз

X,Y

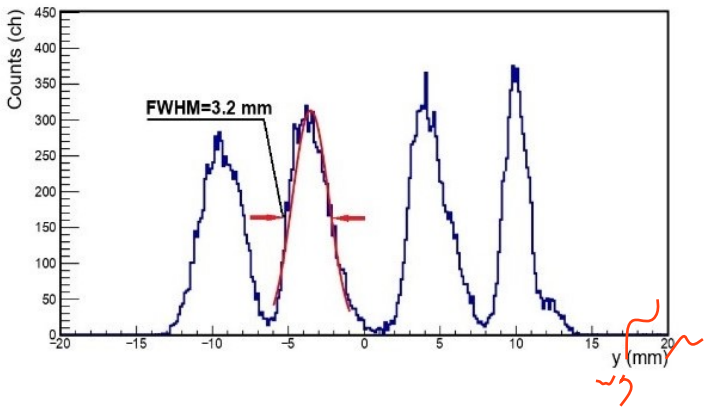


а) **б)**

Рис. 7



а)



б)

Рис. 8

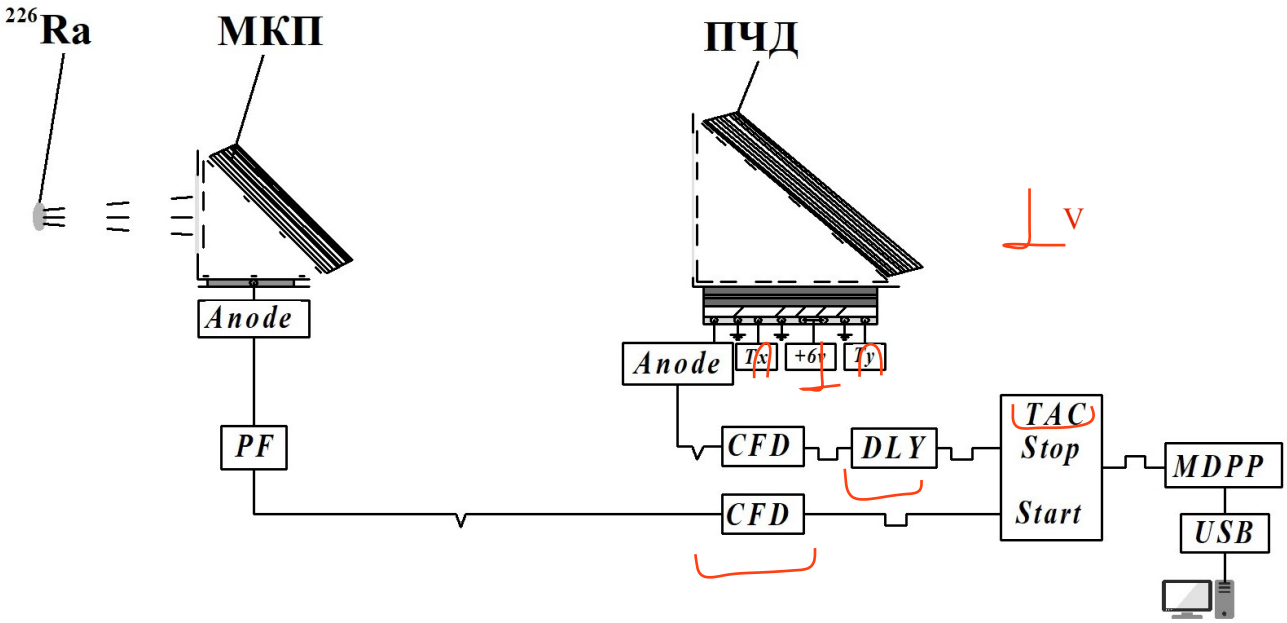

226Ra
МКП
ПЧД
V
Anode
Anode
Tx
+6v
Ty
PF
CFD
DLY
TAC
Stop
Start
MDPP
CFD
USB

Рис. 9

Рис. 10

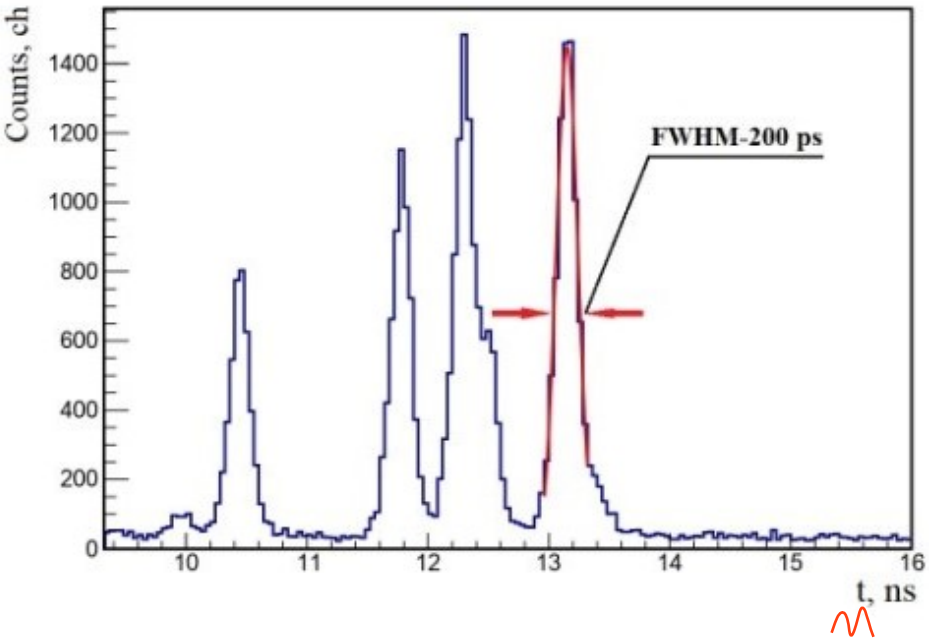

Counts, ch
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
10
11
12
13
14
15
16
t, ns
FWHM-200 ps

Рис. 11

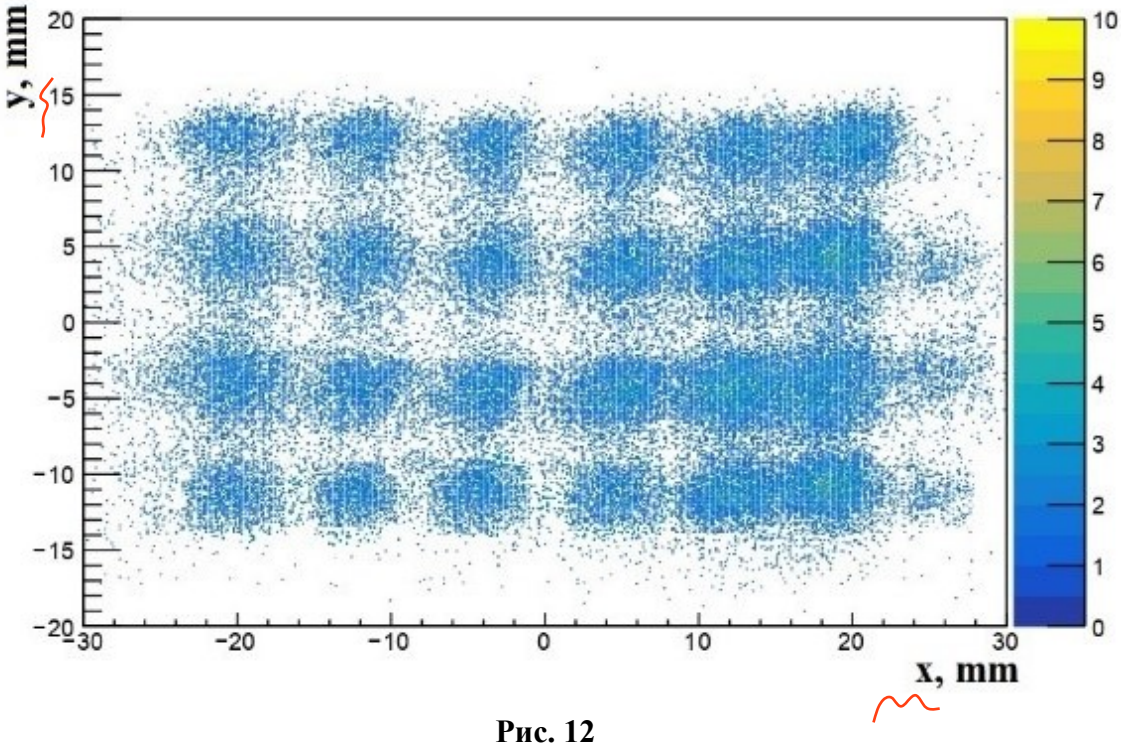
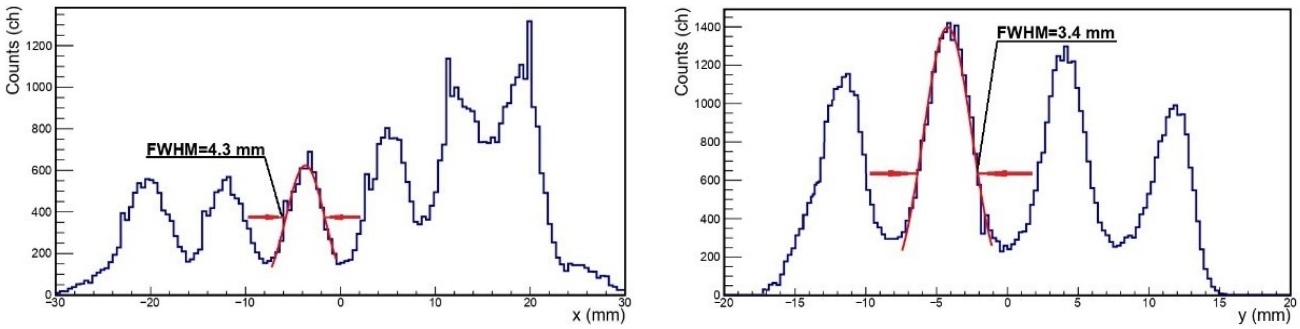


Рис. 12



а) б)

Рис. 13

Для связи в автором:

Азнабаев Даурен

Тел.: 8-903-670-07-16 (моб.)

E-mail: daur_is101@jinr.ru

В помощь переводчику:

POSITION SENSITIVE DETECTOR BASED ON MICROCHANNEL PLATES FOR MEASURING THE CHARACTERISTICS OF FISSION FRAGMENTS AT THE MAVR FACILITY

This paper presents the results of measurements of fission fragments using a time-of-flight system with a position-sensitive detector based on microchannel plates, designed to measure the masses of nuclear reaction products at the MAVR facility. The advantage of such MCPs is their high positional sensitivity and high efficiency of registration of heavy charged particles with low energy. The paper presents a technical description of the fission fragments registration system and the results of measuring the parameters of a position-sensitive detector based on large-area microchannel plates (40 x 60 mm) obtained by measuring 252Cf spontaneous fission fragments. The coordinate resolution along the X and Y axes was determined when fission fragments were registered in the 14N+192Au reaction at the MAVR installation. The time resolution of the PSD was obtained by registration the time of flight of alpha particles emitted by the radioactive source 226Ra.