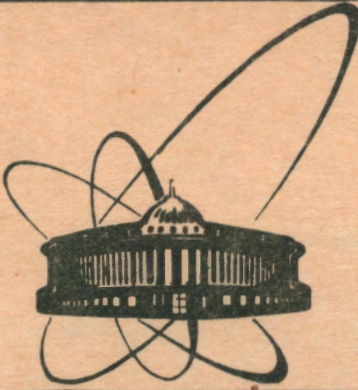


91-134



**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

**P13-91-134**

**А.И.Амелин\*, С.В.Бесфамильнов\*, Ю.А.Будагов,  
М.Г.Горнов\*, Ю.Б.Гуров\*, А.Л.Ильин\*,  
П.В.Морохов\*, Б.П.Осипенко, В.А.Печкуров\*,  
В.И.Савельев\*, В.Г.Сандуковский, А.В.Шишков\*,  
Р.Р.Шафигуллин\***

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МИКРОСТРИПОВЫХ  
ДЕТЕКТОРОВ**

---

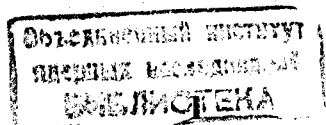
**\*Московский инженерно-физический институт**

**1991**

## ВВЕДЕНИЕ

Интерес к созданию и использованию координатно-чувствительных полупроводниковых детекторов с высоким пространственным разрешением не ослабевает последние 10-15 лет. Обуславливается он необходимостью определения с высокой точностью положения треков частиц в физике высоких энергий /1/. Наиболее полно удовлетворяют этим целям микростриповые полупроводниковые детекторы /МСД/-приборы, у которых отдельные регистрирующие элементы выполнены в виде полосок, размещенных на одной кремниевой пластине.

Достижения в области технологии получения исходных полупроводниковых материалов большого диаметра (50-70 мм), а также микроэлектронной технологии, в особенности планарной /2/, позволяют в настоящее время создавать микростриповые детекторы, удовлетворяющие требованиям физических исследований: исходный материал подложки - высокоомный кремний ( $S_i$ )  $\approx 2-10$   $\Omega\text{м}\cdot\text{см}^2$ , толщина  $\approx 300$  мкм, чувствительная область детектора -  $10-30$   $\text{см}^2$ , ширина стри-



пов - 20-200 мкм, шаг стрипов - 20-400 мкм, количество стрипов 100-1000.

Наряду с использованием МСД в области физики высоких энергий следует также отметить перспективность использования МСД для регистрации частиц низких и промежуточных энергий. Высокие координатные и спектрметрические характеристики МСД позволяют получать в этой области энергий достаточно полную информацию об исследуемых частицах; координату, энергию, и возможность идентификации. Реализация на практике возможностей МСД в различных областях требует детального исследования параметров и характеристик этих приборов.

Не менее важным вопросом использования МСД в современных экспериментах является создание адекватного электронного обеспечения систем съема и обработки информации, требующей до  $10^4$ - $10^5$  высокоточных, быстродействующих измерительных каналов.

В работе приводятся результаты исследования микростриповых детекторов с целью создания координатных устройств высокой точности, планируемых для использования в экспериментах на УНК/З/. Результаты получены на созданной методической установке, позволяющей исследовать как координатные, так и спектрметрические характеристики микростриповых детекторов. Получены оценки пространственного разрешения детекторов с использованием различных методик выделения координатной информации для широкого диапазона энергий, а также оценки энергетического разрешения детекторов.

## МИКРОСТРИПОВЫЙ ДЕТЕКТОР (МСД)

Образцы МСД, созданные на предприятии "Tesla", изготовлены из высокоомного кремния (Si) n-типа, с удельным сопротивлением  $\rho \approx 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2 / 4$ . Чувствительная площадь -  $20 \times 18 \text{ мм}$ , толщина - 300 мкм, ширина стрипов - 200 мкм, шаг стрипов - 500 мкм. Количество стрипов - 40 шт. Общая площадь кремниевой пластины -  $40 \times 40 \text{ мм}$ . Кремниевая пластина конструктивно крепится на керамическое основание с нанесенными печатным способом проводниками для разводки стрипов и возможностью подсоединения разъема с шагом 2,25 мм.

Качество МСД и выбор его оптимальных режимов работы оцениваются достаточно простыми и информативными характеристиками - зависимостью обратного ("темнового") тока и емкости перехода от приложенного напряжения.

Как известно, обратный ток (сумма диффузионных, генерационных, рекомбинационных и токов утечки на поверхности) определяет шумовые характеристики и, следовательно, соотношение сигнал/шум. Лучшие образцы МСД имеют обратные токи (при комнатной температуре и соответствующем рабочем напряжении)  $\approx 5 \text{ нА/см}^2$  на 100 мкм толщины Si /5/. На рис.1а представлены зависимости темнового тока от напряжения обратного смещения МСД для трех стрипов, типичных для данного детектора. Значение емкости перехода характеризует степень обеднения чувствительной области детектора и используется для определения оптимального рабочего напряжения. На рис.1б представ-

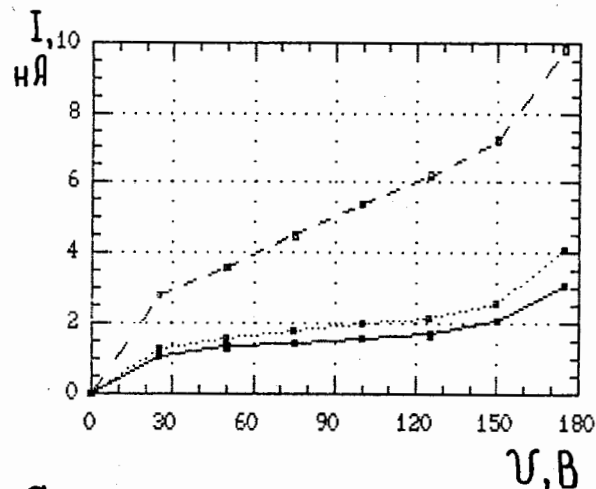


Рис. 1а. Вольт-амперные характеристики трех различных стрипов.

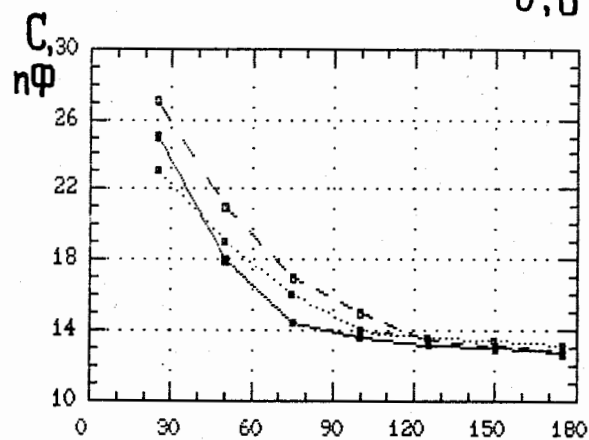


Рис. 1б. Вольт-емкостные характеристики трех различных стрипов.

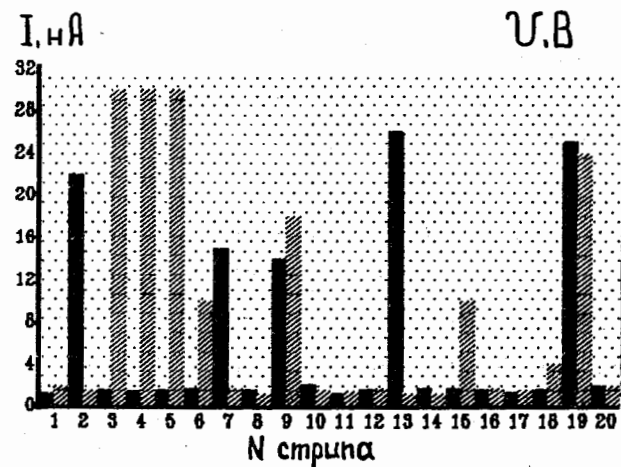


Рис. 2. Значения обратных токов всех стрипов МСД.

лены зависимости емкости перехода от обратного смещения. Для данного детектора напряжение полного обеднения составляет 160 В. На рис. 2 приведены значения обратных токов для всех стрипов МСД при напряжении 160 В, различия в обозначении определяются выводами стрипов на две стороны. Наиболее вероятное значение "темнового" тока стрипов составляет 1,5 нА.

### 3. МЕТОДИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА И СИСТЕМА СЪЕМА ИНФОРМАЦИИ

Для исследования характеристик МСД и выбора оптимальных методов съема координатной и спектрометрической информации, а также разработки соответствующего электронного обеспечения создана методическая установка с электронной системой съема и обработки информации. Установка включает в себя вакуумную камеру с конструктивными элементами крепления МСД, платы детекторной первичной электроники, систему перемещения и коллимации источника ионизирующего излучения. Электронная система съема и обработки информации состоит из 8 прецизионных спектрометрических трактов и 2 быстрых логических трактов. Спектрометрические тракты включают зарядочувствительный предусилитель, спектрометрический усилитель, аналогоцифровой преобразователь. Общий коэффициент усиления  $\cong 10^5$ , аналогоцифровое преобразование на  $2^{10}$  разрядов, постоянные времени формирования  $\cong 0,1-1$  мкс. Логические каналы включают быстрый усилитель, формирователь, постоянные времени

формирования логических трактов  $\approx 50$  нс и логическую схему. Все каналы объединены в единую систему и связаны с ЭВМ.

Электронная система обеспечила возможность исследования важнейших элементов детекторной электроники МСД, в частности, зарядочувствительного предусилителя. Исследования показали возможность использования гибридных зарядочувствительных предусилителей ПУ О4УИ6 для реализации многоканальной детекторной первичной электроники средней сложности ( $\approx 100$  каналов). Собственное энергетическое разрешение предусилителей ПУ О4УИ6 составляет  $\approx 4$  кэВ (по кремнию).

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МСД

##### 4.1. Спектрометрические характеристики

Получение прецизионной координатной информации тесно связано со спектрометрическими характеристиками МСД, а в некоторых применениях ставится задача непосредственной регистрации сбросов энергии наряду с координатной информацией.

Для исследования собственного энергетического разрешения МСД комплектовался зарядочувствительным предусилителем ORTEC 120-3F. На рис. 3 приведен  $\gamma$ -спектр источника  $^{241}\text{Am}$ , полученный с отдельного стрипа, энергетическое разрешение составило  $\Delta E \approx 2$  кэВ (FWHM) для энергии  $E_\gamma = 17,8$  кэВ.

Энергетическое разрешение МСД с предусилителями ПУ О4УИ6 исследовалось с помощью  $\gamma$ -источника  $^{241}\text{Am}$

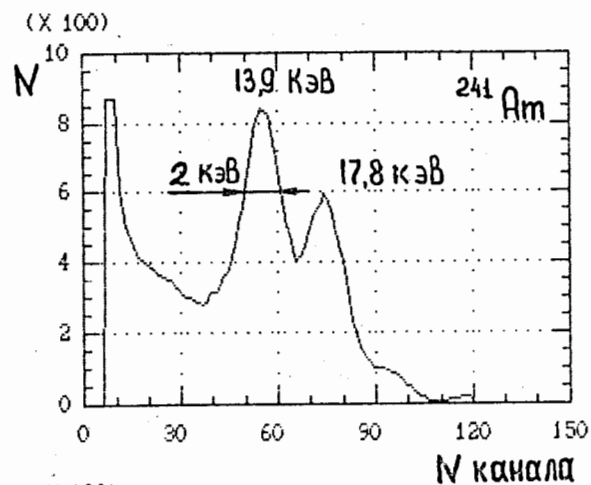


Рис. 3. Спектр  $^{241}\text{Am}$  ( $\gamma$ ), полученный с использованием предусилителя ORTEC.

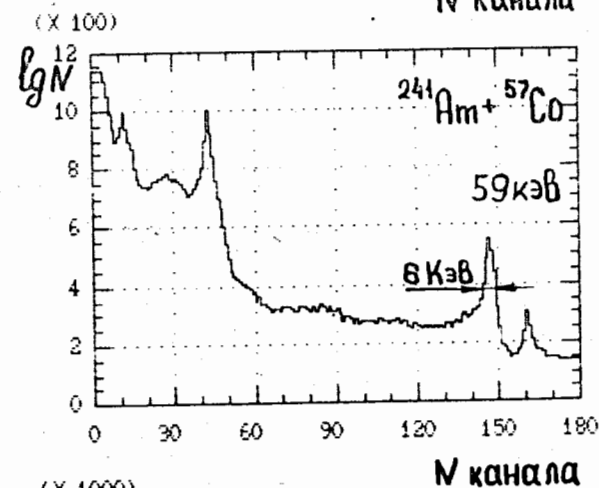


Рис. 4. Спектр  $^{241}\text{Am} + ^{57}\text{Co}$  ( $\gamma$ ), полученный с использованием предусилителя ПУ О4УИ6.

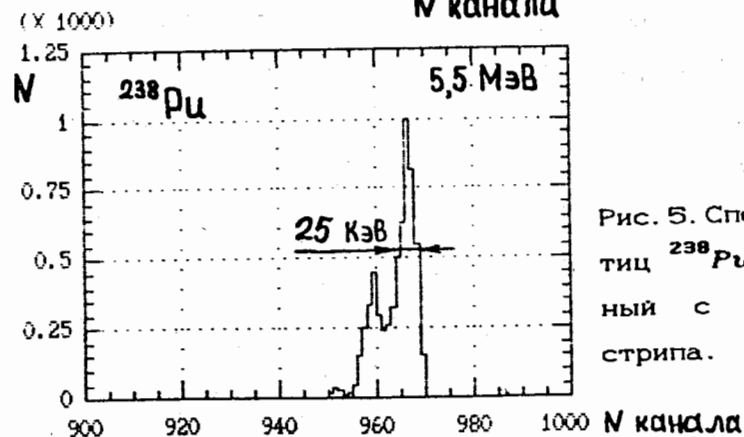


Рис. 5. Спектр  $\alpha$ -частиц  $^{238}\text{Pu}$ , полученный с отдельного стрипа.

$^{57}\text{Co}$ . На рис. 4 представлен спектр  $\gamma$ -источника  $^{241}\text{Am} + ^{57}\text{Co}$ , энергетическое разрешение составило  $\Delta E \approx 6$  кэВ (FWHM) на энергии 59 кэВ.

Исследования, проведенные с использованием  $\alpha$ -источника  $^{238}\text{Pu}$  ( $E=5,5$  МэВ), позволили не только определить энергетическое разрешение, но и получить информацию о структурных параметрах МСД. На рис. 5 представлен спектр  $^{238}\text{Pu}$  при коллимировании  $\alpha$ -частиц на площадь стрипа. Энергетическое разрешение в этом случае составило для  $\alpha$ -частиц  $\Delta E \approx 25$  кэВ (FWHM).

При исследовании спектра не коллимированного  $\alpha$ -источника  $^{238}\text{Pu}$  для отдельного стрипа наблюдаются особенности, определяемые структурой МСД (рис. 6 а). Пик с энергией  $E=5,5$  МэВ смещен в сторону меньших энергий и имеет сложную структуру. Возникновение такой структуры спектра происходит из-за разницы в толщинах мертвых слоев в области стрипа и в межстриповой области, а сбор зарядов происходит со всей площади. По величине сдвига пиков были определены толщины мертвых слоев  $\approx 2,0$  и  $0,8$  мкм для области стрипа ( $\text{Al}$  контакт) и межстриповой области ( $\text{SiO}_2$ ) соответственно.

При подключении всех стрипов МСД в рабочий режим наблюдается характерное изменение регистрируемых спектров отдельными стрипами (рис. 6 б). Видно, что в рабочей области на стрипе наблюдается одиночный пик и распределенная подложка. Это объясняется, по-видимому, разными механизмами сбора заряда, так как при попадании частицы в межстриповую об-

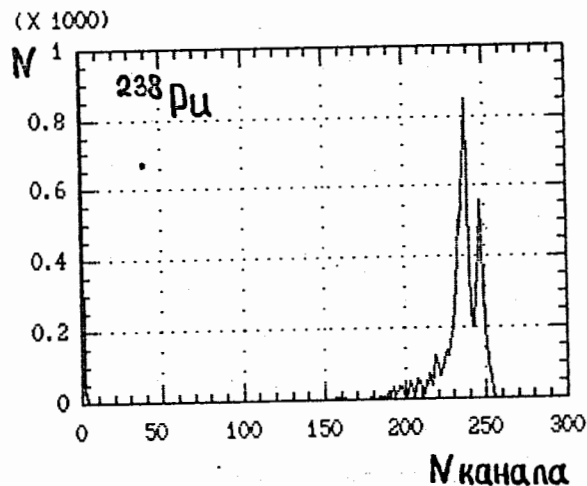


Рис. 6а. Спектр  $\alpha$ -частиц  $^{238}\text{Pu}$ , полученный с отдельного стрипа при неработающих соседних стрипах.

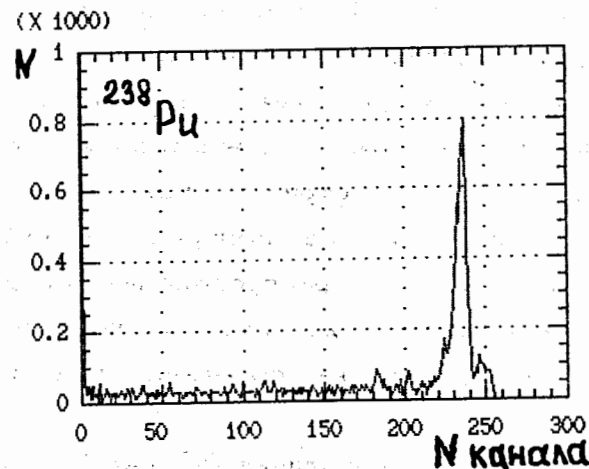


Рис. 6б. Спектр  $\alpha$ -частиц  $^{238}\text{Pu}$ , полученный с отдельного стрипа при работающих соседних стрипах.

ласть происходит деление заряда в приповерхностном слое и сигнал от  $\alpha$ -частицы распределяется между двумя стрипами, образуя подложку. Эти результаты согласуются с данными работы [6] и показывают возможность получения лучшего пространственного разрешения (чем шаг  $\sqrt{12}$ ) за счет зарядового деления в межстриповых областях.

#### 4.2. Координатные характеристики

Координатные характеристики исследовались при помощи многоканальной системы считывания, позволяющей одновременно регистрировать сигналы с последовательного ряда стрипов.

Для анализа возможностей построения многоканальной первичной электроники на основе предусилителей ПУ 04УИБ проведены исследования их взаимного влияния на спектрометрические характеристики считывающих каналов. На рис.7 представлены спектры с трех последовательных стрипов МСД (+1, 0, -1) при коллимировании  $\alpha$ -частиц на центральном (0) стрипе. Из анализа приведенных распределений следует, что даже при регистрации достаточно больших сбросов энергии, величина шума на соседних стрипах не превышает 10 кэВ.

Методы получения координатной информации в значительной степени определяются процессами собирания зарядов, образованных ионизирующей частицей при прохождении детектора, при этом наибольший интерес представляет случай прохождения частицей межстрипо-

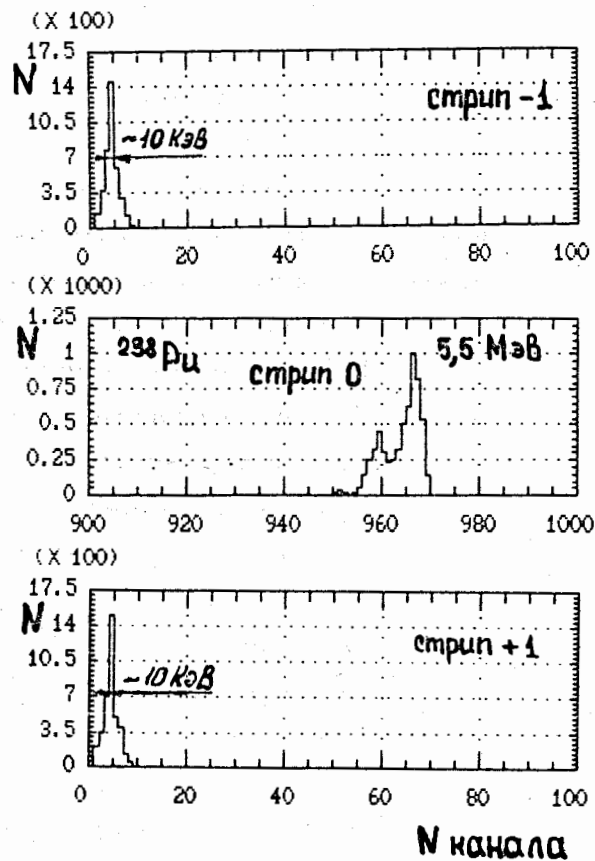


Рис.7. Спектр  $\alpha$ -частиц  $^{238}\text{Pu}$  с трех последовательных стрипов (+1, 0, -1) при коллимировании частиц на центральном (0) стрипе.

вой области. С этой целью источник  $\alpha$ -частиц предварительно коллимировался на межстриповый промежуток и анализировались сигналы с 4 соседних стрипов. Использование короткопробежных частиц обуславливает сбор индуцированных зарядов только на два соседних информационных стрипа. В этом случае удастся достаточно эффективно отбирать частицы в исследуемом межстриповом промежутке, используя сигналы с внешних стрипов по отношению к информационным стрипам.

На рис. 8 а, б представлены двумерные распределения сигналов со смежных информационных стрипов при регистрации  $\alpha$ -частиц для двух значений напряжения обратного смещения. Видно, что в режиме недообеднения ( $U_{см} \approx 90$  В) чувствительной области происходит деление заряда между стрипами (рис. 8а), определяющееся местом попадания  $\alpha$ -частицы. Значения пересечения осей с кривой деления зарядов соответствуют полным сбросам энергий  $\alpha$ -частиц, в центральной же части наблюдается нелинейность — уменьшение суммарного индуцированного заряда и, соответственно, зарегистрированного сброса энергии. Этот эффект можно объяснить наличием нечувствительного приповерхностного слоя в межстриповой области. Толщина этого слоя зависит от конфигурации собирающих полей соседних стрипов и имеет максимум в центре межстрипового промежутка.

Оптимальный режим разделения заряда (обратное смещение  $\approx 100$  В) имеет характерную особенность — приповерхностная межстриповая область слабо недообеднена, но величина мертвого слоя столь незначи-

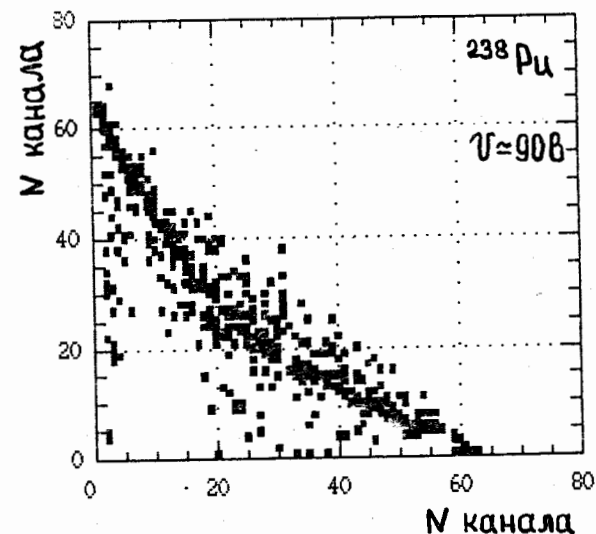


Рис. 8а. Двумерное распределение сигналов со смежных стрипов в режиме недообеднения ( $\approx 90$ В).

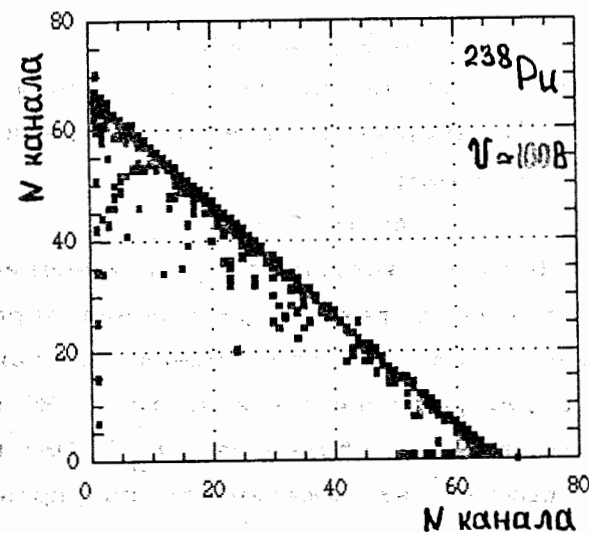


Рис. 8б. Двумерное распределение сигналов со смежных стрипов в режиме разделения заряда ( $\approx 100$ В).



тельна, что не влияет на потери энергии  $\alpha$ -частицами (рис. 8б) и наблюдается достаточно линейная зависимость деления индуцированного заряда. В этом случае положение координаты места прохождения частицы в межстриповом промежутке можно определить достаточно точно, используя соотношение сигналов с соседних стрипов. Координатное разрешение МСД в этом случае определяется /6/:

$$\sigma_x = \alpha S \times (\sigma_w / \Delta E),$$

где  $S$  - межстриповое расстояние,  $\alpha$  - поправочный коэффициент.

Интерполяционный коэффициент  $\Delta E / \sigma_x$  и координатное разрешение  $\sigma_x$ , как следует из этого выражения, сильно зависят от величины сброса энергии в детекторе и для  $\alpha$ -частиц составляет достаточно большую величину;

$$\Delta E / \sigma_w \cong 250,$$

соответственно для минимально ионизирующих частиц величина сброса энергии в кремнии толщиной  $\approx 300$  мкм составляет  $\cong 100$  кэВ;

$$\Delta E / \sigma_w \cong 10.$$

Таким образом, координатное разрешение в межстриповой области в режиме разделения заряда достаточно высоко - для  $\alpha$ -частиц оценка составляет единицы мкм, а для релятивистских частиц  $\cong 20$  мкм.

В режиме полного обеднения,  $U_{см} \cong 180$  В, собирающее поле выходит на поверхность полупроводникового кристалла и заряд, образованный ионизирующей частицей, собирается большей частью на ближайший от места прохождения стрип, перераспределение заряда из-за

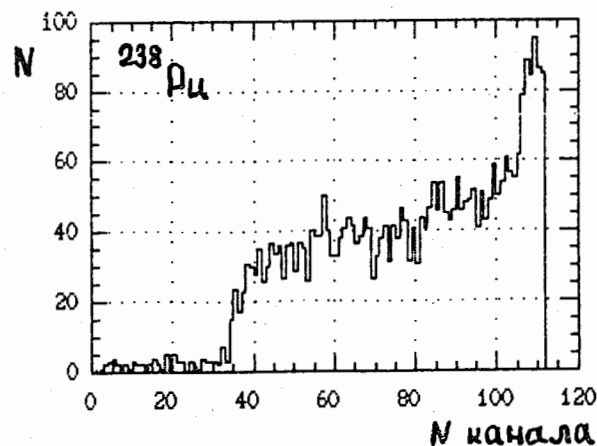
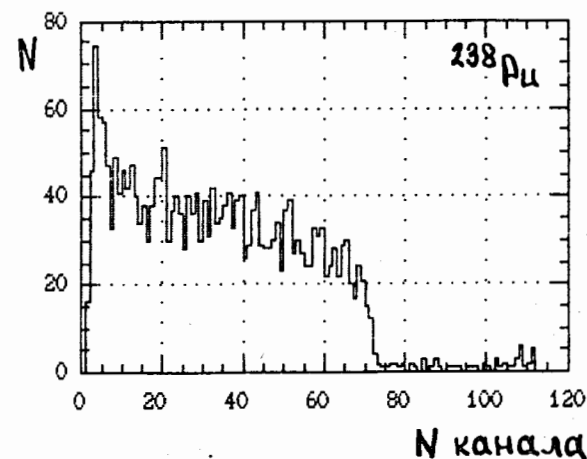


Рис. 9. Спектры  $\alpha$ -частиц  $^{238}\text{Pu}$  с двух соседних стрипов при коллимировании межстриповой области.

поверхностных токов незначительно. В этом случае пространственное разрешение определяется шагом стрипов  $S$ :

$$\sigma_x = S/\sqrt{12} \cong 144 \text{ мкм.}$$

Для  $\alpha$ -частиц  $^{238}\text{Pu}$  получена непосредственная экспериментальная оценка пространственного разрешения с использованием краевого коллиматора. Коллиматор устанавливался над межстриповой областью параллельно считывающим стрипам. На рис.9 представлены спектры  $\alpha$ -частиц для двух смежных стрипов, ограничивающих эту область. Оценка пространственного разрешения составила  $\sigma_x = 10$  мкм, что, вероятно, определяется недостаточно качественным изготовлением краевого коллиматора и точностью его установки параллельно стрипам.

#### 4.3. Спектрометрические характеристики МСД в координатном режиме

Для определения энергетического разрешения МСД в режиме разделения заряда предполагается суммирование сигналов со стрипов, участвующих в сборе заряда от ионизирующей частицы. В нашем случае эта величина определяется соотношением:

$$\Delta E_{1+2} = \Delta E_{1,2} \times \sqrt{2}.$$

На рис.10 представлены спектры сбросов энергии  $\alpha$ -частиц  $^{238}\text{Pu}$  с соседних стрипов при коллимировании межстриповой области в режиме разделения заряда и их суммы. Энергетическое разрешение для событий, зарегистрированных в межстриповой области рав-

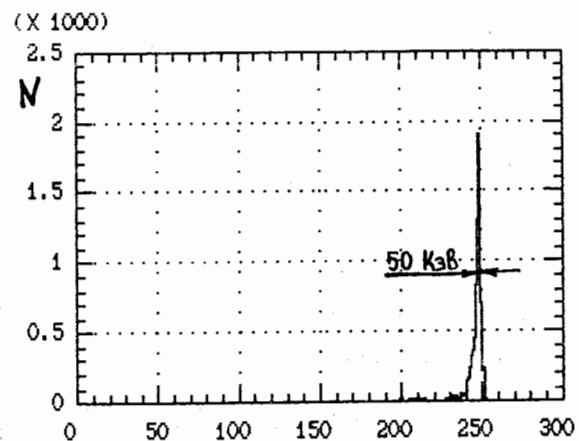
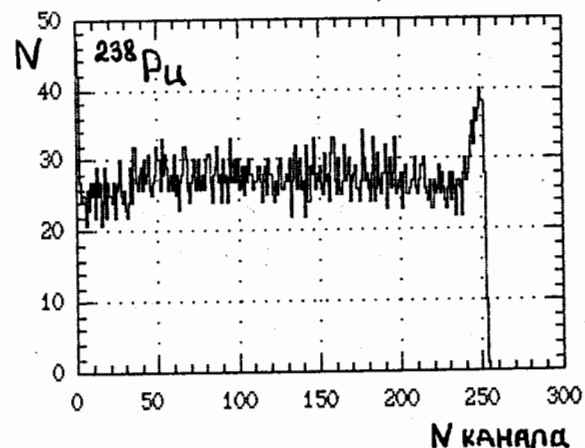
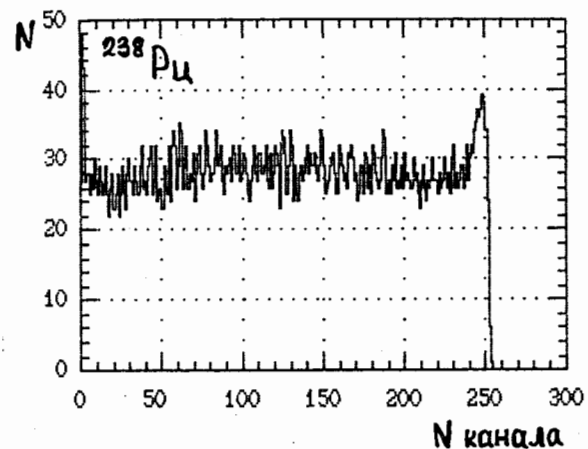


Рис.10. Спектры  $\alpha$ -частиц  $^{238}\text{Pu}$  с соседних стрипов в режиме разделения заряда ( $\approx 100\text{В}$ ) и их сумма.

но  $\Delta E \approx 50$  кэВ, что также указывает на линейность деления заряда в межстриповой области.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Анализ полученных результатов методических исследований МСД с помощью радиоактивных источников дает возможность определения основных параметров и характеристик МСД с достаточно высокой точностью. Проведенные исследования являются основой для дальнейшей разработки координатно-чувствительных устройств в виде сборок данных детекторов и использования их в экспериментальных исследованиях на пучках ускорителей.

Необходимо отметить возможность получения с микростриповых детекторов не только координатной, но и прецизионной спектрометрической информации. Это является важным стимулом в плане использования микростриповых полупроводниковых детекторов не только в физике высоких энергий, но и для области низких и промежуточных энергий.

### Литература

1. C.J.S. Damerell. RAL-84-123, 1984.
2. V. Radeka. NIM A 226, 1984, p209.
3. Workshop on the experimental program at UNK (proceedings), Serpukhov, 1980.
4. M. Dubnicka. NIM A 253, 1987, p360.
5. H. Boettcher et al. NIM A 226, 1984, p72.
6. S.R. Amendolia et al. NIM A 226, 1984, p82.

Рукопись поступила в издательский отдел

20 марта 1991 года.

Амелин А.И. и др.

P13-91-134

Исследование характеристик полупроводниковых  
микростриповых детекторов

Представлены характеристики микростриповых детекторов, изготовленных на предприятии "Tesla". Исследовалось резистивное деление заряда между соседними стрипами при работе детектора в слабо недообеденном режиме. Полученные пространственные и энергетические характеристики позволяют сделать вывод о возможности использования таких детекторов в области низких и промежуточных энергий. Планируется использование МСД на УНК.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1991

Перевод авторов

Amelin A.I. et al.

P13-91-134

The Investigation of the Performances  
of Semiconductor Microstrip Detectors

The performances of microstrip detectors manufactured by "Tesla" are presented. The detectors are operated in slightly underdepleted mode and resistive charge partition between adjacent strips is investigated. Spatial and energy characteristics received permit to conclude about the possibility of using such detectors in the low and middle energy region. It is planned to use MSD at UNK.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1991