



Ордена Ленина и ордена Октябрьской Революции

Институт атомной энергии

им. И. В. Курчатова

И.Б.Мазуров, Ю.Г.Сибиряк

ИАЭ-4849/14

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
МНОГОКАНАЛЬНЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
ПРИ ВЫСОКИХ ВХОДНЫХ ЗАГРУЗКАХ**

Москва – ЦНИИАтоминформ – 1989

Ключевые слова: стробируемый интегратор, времяизменяемый фильтр, детектор, энергетическое разрешение, предусилитель, восстановитель базового уровня, компенсация полюса нулем.

Исследованы загрузочные характеристики усилительных трактов, входящих в состав многоканального спектрометра заряженных частиц. Измерены величина сдвига монопика и изменение его разрешения в зависимости от входных загрузок, определены интервалы нечувствительности режектора наложенных импульсов (РНИ). Получены спектры в области двойных наложений при различных постоянных времени формирования в быстром фильтрующем усилителе. Проведена оценка эффективности режекции импульсов от статистического генератора и полупроводникового детектора. Измерены счетные характеристики усилительного тракта, приведены результаты расчета просчетов усилительного тракта спектрометра при работе РНИ.

The article describes the basic dynamic characteristics of the amplifying tracts being a part of multichannel spectrometer of charged particles at high counting rates.

The values of the peak-shift and the resolution change depending on input counting rates have been measured. The dead-time of the pile-up rejection have been determined.

The spectra have been obtained in the region of double superimpositions formed at various time constants in the fast filtering amplifier.

The impulse rejection efficiency for the random generator and semiconductor detector has been estimated. The counting rates characteristics of the amplifying tracts and the calculation of the dead-time losses with pile-up rejection have been presented.

Поведение характеристик усилительных трактов при обработке импульсов зарядово-чувствительных предусилителей в широком диапазоне входных нагрузок от 10 до 10^6 имп./с представляет большой интерес, так как от стабильности характеристик зависит достоверность и эффективность регистрации редких событий на фоне более интенсивных побочных событий, продолжительность экспериментов.

Как правило, аналого-цифровые преобразователи измеряют амплитуды импульсов относительно некоторого базового уровня, поэтому смещение последнего приводит к искажению амплитуды регистрируемого импульса. Смещение базового уровня на выходе усилительного тракта вызывается медленным изменением потенциалов усилительных элементов, остаточными напряжениями реактивных элементов (С и L). Быстрое смещение базового уровня — флуктуация базового уровня — происходит за счет, главным образом, наложения импульсов друг на друга в зарядово-чувствительном предусилителе, основном формирующем усилителе. Медленное смещение базового уровня можно практически исключить выбором соответствующих стабильных элементов, операционных усилителей с низким температурным дрейфом, локальными или общими температурно-компенсирующими схемами либо цепями.

Влияние флуктуации базового уровня на точность измерения амплитуды импульса устраняется с помощью восстановителей постоянной составляющей (ВПС) ключевого типа [1] и РНИ [2].

С точки зрения точности измерения амплитудных спектров флуктуация базового уровня, вызванная наложениями импульсов друг на друга, приводит к смещению, например, монопиков, их уширению, появлению ложного спектра в области между основным монопиком и пиком, соответствующим дважды наложенным импульсам, пришедшим одновременно и по амплитуде равным амплитуде монопика. Если измеряются спектры очень редких событий, попадающие в эту область, то достоверность их выделения из общего фона резко падает, не говоря уж об измерении их спектров [3].

Исследование многоканального спектрометра заряженных частиц заключалось: в измерении смещения монопика при изменении входных нагрузок; в определении эффективности работы схемы режекции нало-

жений от длительности импульсов, приходящих на вход РНИ и входных загрузок; в определении интервала нечувствительности режектора. Исследования проводились с помощью генератора спектрометрических импульсов [4], в режиме генерации импульсов стабильной амплитуды, моменты появления которых статистически распределены во времени по закону Пуассона, и на пучке заряженных частиц циклотрона ИАЭ им. И.В. Курчатова.

Усилительный тракт многоканального спектрометра заряженных частиц содержал: зарядово-чувствительный предусилитель [5], спектрометрический блок измерения и обработки сигналов полупроводниковых детекторов [6], быстрый фильтрующий усилитель [7]. Структурная схема экспериментальной установки показана на рис. 1.

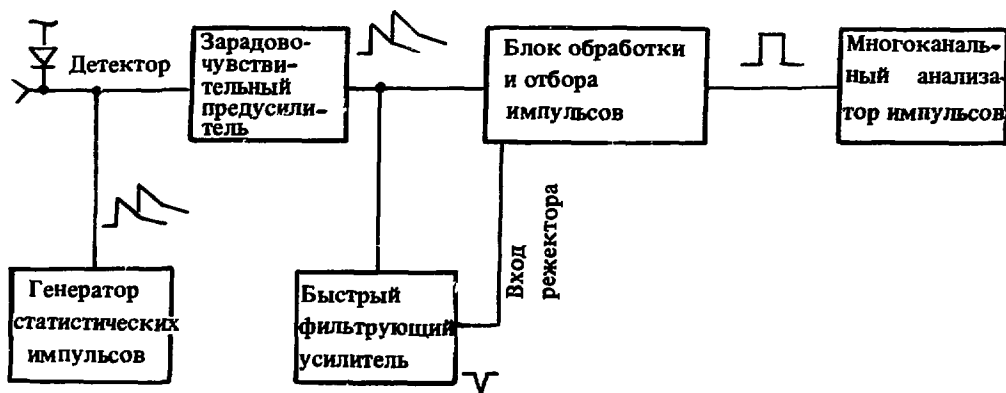


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки

1. ИЗМЕРЕНИЕ СМЕЩЕНИЯ И УШИРЕНИЕ МОНОПИКА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ВХОДНОЙ ЗАГРУЗКИ

На вход усилительного тракта с генератора [4] подавались статистически распределенные во времени импульсы экспоненциальной формы с фронтом $\tau_n = 15$ нс, спадом $\tau_{сп} = 10$ мкс, амплитудой эквивалентной 500 кэВ. Входная нагрузка изменялась от 10^2 до 10^6 имп/с. Импульсы с выхода усилительного тракта измерялись с помощью многоканального анализатора импульсов АИ-1024-95. Полученные результаты представлены в таблице. Как видно из таблицы, смещения монопики в зависимости от входной загрузки с точностью до цены канала анализатора не наблюдается до загрузок $4 \cdot 10^5$ имп./с (цена канала анализатора была откалибрована и составляла 0,58 кэВ/канал).

Входная нагрузка усилительного тракта, имп./с	Положение пика, канал	Ширина пика Δ на уровне 0,5, канал
10^3	856	4,5
$8,7 \cdot 10^3$	856	4,5
$22 \cdot 10^3$	856	4,5
$4 \cdot 10^4$	856	4,52
$5,4 \cdot 10^4$	856	4,6
$7,5 \cdot 10^4$	856	4,7
$10,9 \cdot 10^4$	856	4,87
$1,55 \cdot 10^5$	856	5
$2,4 \cdot 10^5$	856	6
$4,25 \cdot 10^5$	856	7
$6 \cdot 10^5$	855	
$7,8 \cdot 10^5$	854	

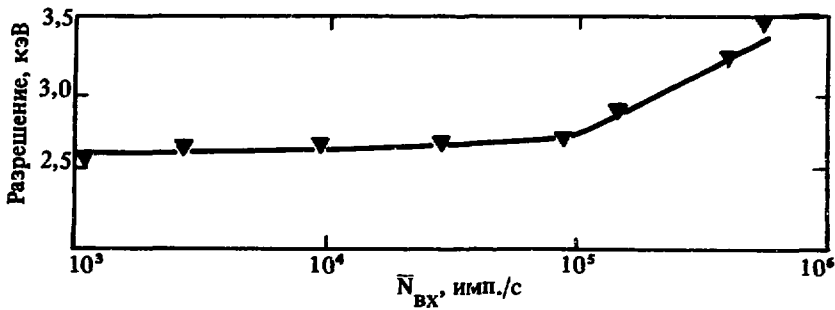


Рис. 2. Зависимость разрешения усилительного тракта от величины входной нагрузки

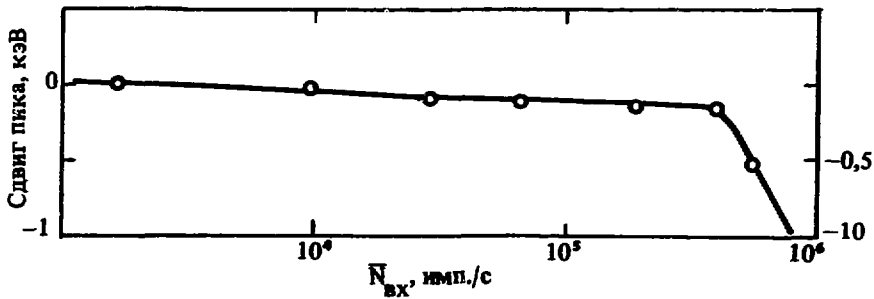


Рис. 3. Зависимость смещения монопика усилительного тракта от величины входной нагрузки

На рис. 2 и 3 показаны зависимости изменения разрешения и смещения монопика от входной загрузки, в единицах энергии кэВ. Для сравнения на рис. 4 показаны зависимости разрешения и сдвига монопика от входных загрузок усилителя 572 фирмы "Ортек".

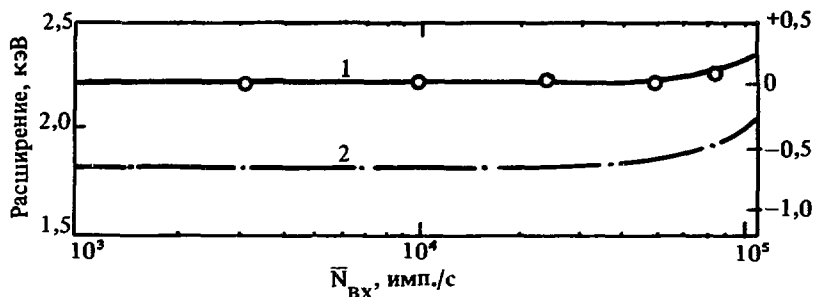


Рис. 4. Зависимости смещения монопика (1) и разрешения (2) от входных загрузок усилителя 572 фирмы "Ортек"

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЖЕКТОРА НАЛОЖЕННЫХ ИМПУЛЬСОВ

Режектор наложенных импульсов спектрометра выполнен по принципу счета импульсов в заданном временном интервале инспекции $T_{инс}$. Если в течение интервала инспекции $T_{инс}$ приходят два импульса, то такие импульсы считаются наложенными и они исключаются из регистрации. Если наложение импульсов произошло на интервале более $T_{инс}$, т.е. в интервале формирования плоской вершины выходного импульса, то первый импульс регистрируется, а "мертвое" время спектрометрического блока измерения и обработки сигналов полупроводниковых детекторов продлевается на величину, равную разности времени прихода второго и первого импульсов. На наш взгляд, такое техническое решение построения режектора наложенных импульсов в усилительных устройствах, использующих времяизменяемые фильтры, наиболее оптимально при работе с полупроводниковыми детекторами, имеющими быстрое время собирания и малую дисперсию времени собирания носителей заряда. Очень важным параметром в РНИ является интервал нечувствительности режектора, т.е. временной интервал, в котором РНИ воспринимает два пришедших импульса как один и вследствие этого дает разрешение на их регистрацию. Из самых общих соображений следует, что погрешности из-за наложенных импульсов тем меньше, чем уже сформированные импульсы,

например, в виде коротких прямоугольных импульсов, а при δ -импульсах они будут сведены к нулю [1]. Однако такое формирование далеко не оптимально в отношении шумов и помех, и поэтому практический интерес представляют схемы формирования экспоненциальных и гауссовских импульсов. Быстрый фильтрующий усилитель, импульсы которого поступали на вход РНИ, формировал импульсы экспоненциальной формы с постоянными $T_{\text{инт}}$ и $T_{\text{диф}}$ равными 5, 10, 20, 50, 100, 200 нс соответственно. Наши исследования были проведены для определения эффективности режекции при различных постоянных формирования входных импульсов режектора и входных нагрузках.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕРВАЛА НЕЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РНИ

Измерение интервала нечувствительности РНИ проводилось при различных постоянных формированиях импульсов на входе режектора. С помощью генератора [4], в режиме генерации парных импульсов, сдвинутых во времени. Полученные результаты представлены в виде кривой на рис. 5. По вертикальной оси отложен интервал времени между двумя смещенными во времени импульсами в интервалах нечувствительности, по горизонтальной оси суперпозиция наложенных амплитуд в каналах анализатора. Измерения проведены для постоянных времени формирования входных сигналов режектора $T_{\text{инт}} = 5$ нс. Характер поведения кривой сохранялся для всех используемых постоянных времени, только продолжительность кривой сокращается в сторону уменьшения постоянной дифференцирования. (Кривые при $T_{\text{диф}} = 200$ нс (точки А – D), при $T_{\text{диф}} = 100$ нс (точки В – D), при $T_{\text{диф}} = 50$ нс (точки С – D) соответственно). На рис. 6 показаны спектры наложений в области двойных наложений моношика. По вертикальной оси отложено число набранных импульсов в канале анализатора, по горизонтальной оси отложены величины измеряемых амплитуд в каналах анализатора. Кривые 1 – 3 показывают качество работы режектора на статистических импульсах генератора [4] при постоянных формированиях импульсов в быстром фильтрующем усилителе $T_{\text{инт}} = 5$ нс, $T_{\text{диф}} = 50, 100, 200$ нс соответственно. Средняя

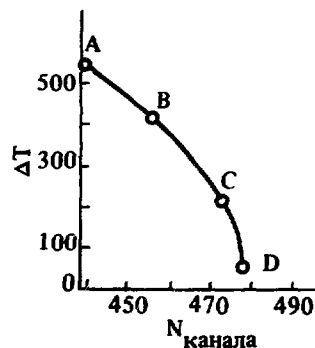


Рис. 5. Зависимости интервала нечувствительности РНИ от постоянных формирования входных импульсов на входе режектора

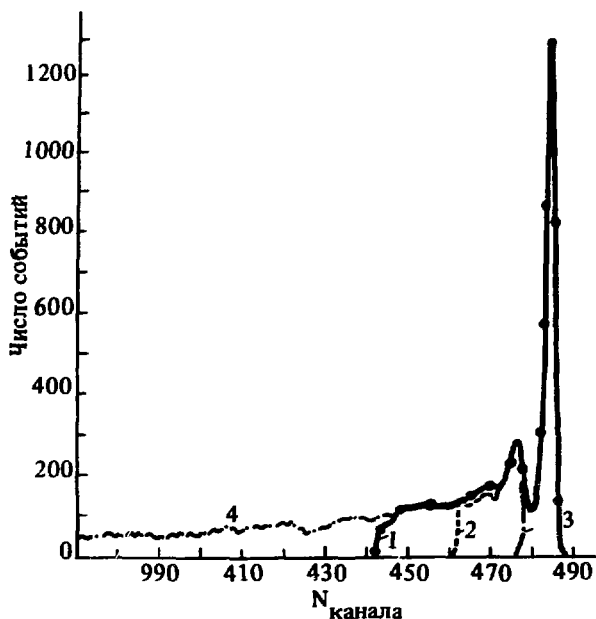


Рис. 6. Спектры наложений в области двойных наложений монопика при различных постоянных времени формирования импульсов в быстром фильтрующем усилителе: 1 – $T_{\text{диф}} = 200$ нс; 2 – $T_{\text{диф}} = 100$ нс; 3 – $T_{\text{диф}} = 50$ нс; 4 – спектр двойных наложений без режекции

входная загрузка усилительного тракта составляла 10^4 имп./с. Кривая 4 показывает спектр наложений при работе аналогового канала без РНИ. На всех кривых наблюдается узкий пик двойных наложений, т.е. пик, полученный наложением двух импульсов, пришедших на вход аналогового канала одновременно. Все полученные кривые показывают достаточно точную адекватность формы спектров наложений в области двойных наложений. Спектры 1 – 3 имеют резкий спад слева от пика двойных наложений. Резкий спад спектров наложений объясняется как раз наличием интервала нечувствительности режектора к близко расположенным по времени импульсам (см. рис. 5). Важно отметить, что интеграл двойных наложений для всех кривых рис. 6 сохраняет одну и ту же величину. Это означает, что режектор работает правильно и не "выдает" части измеряемого спектра. На рис. 7 показан спектр монопика и спектр двойных наложений, измеренный с отключенным РНИ. Слева виден основной — интенсивный монопик, а справа от него спектр наложений с пиком двойных наложений. Подобные измерения с включенным РНИ были проведены и при нагрузках $5 \cdot 10^4$ и 10^5 имп./с. Полученные результаты показали, что интервал нечувствительности сохраняется постоянным и не зависит от

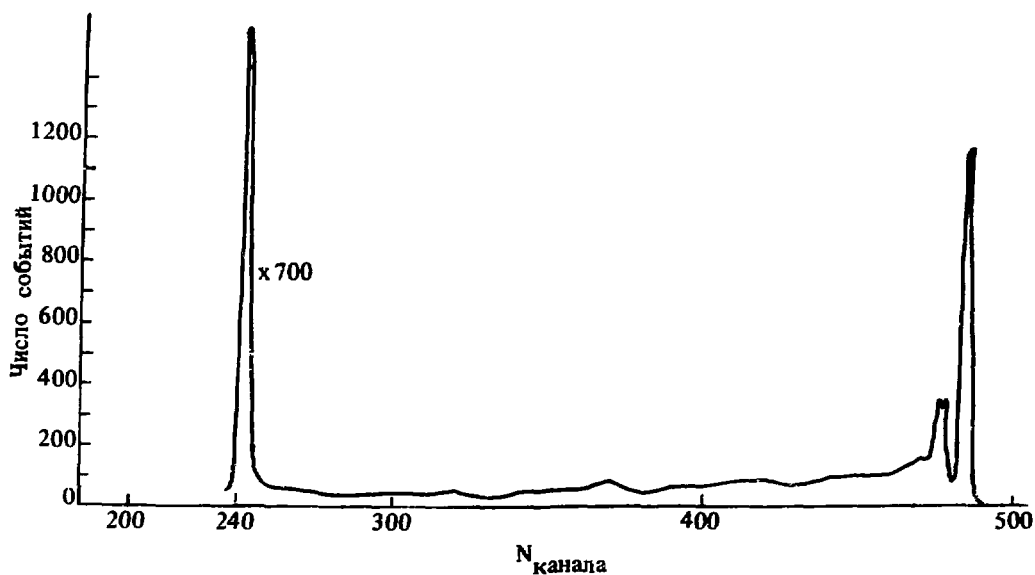


Рис. 7. Спектр наложений с отключенным РНИ

величины входной загрузки. На основании полученных результатов был вычислен коэффициент режекции в интервале амплитуд от основного пика до двойного, и он составил величину 99,7% при постоянной времени $T_{\text{инт}} = 5$ нс, $T_{\text{диф}} = 50$ нс. Вычисленный коэффициент режекции оставался неизменным при входных нагрузках $5 \cdot 10^4$ и 10^5 имп./с.

На рис. 8 показаны спектры упругого рассеяния на золоте ($^{14}\text{N} + \text{Au}$) без РНИ (а) и с включенным РНИ (б) при нагрузках 10^4 имп./с. Коэффициент режекции в области двойных наложений составил величину 98%. Некоторое ухудшение работы режектора можно объяснить качеством используемых детекторов – их временем собирания и флуктуацией времени собирания носителей заряда.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ СЧЕТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСИЛИТЕЛЬНОГО ТРАКТА СПЕКТРОМЕТРА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Для исследования счетных характеристик на вход усилительного тракта подавались статистические импульсы с генератора [4] амплитудой 22 мВ. Счетчик импульсов подсчитывал их число на входе РНИ. Второй счетчик импульсов считал число импульсов, разрешенных РНИ для регистрации. Входная загрузка аналогового канала менялась от 10^3 до

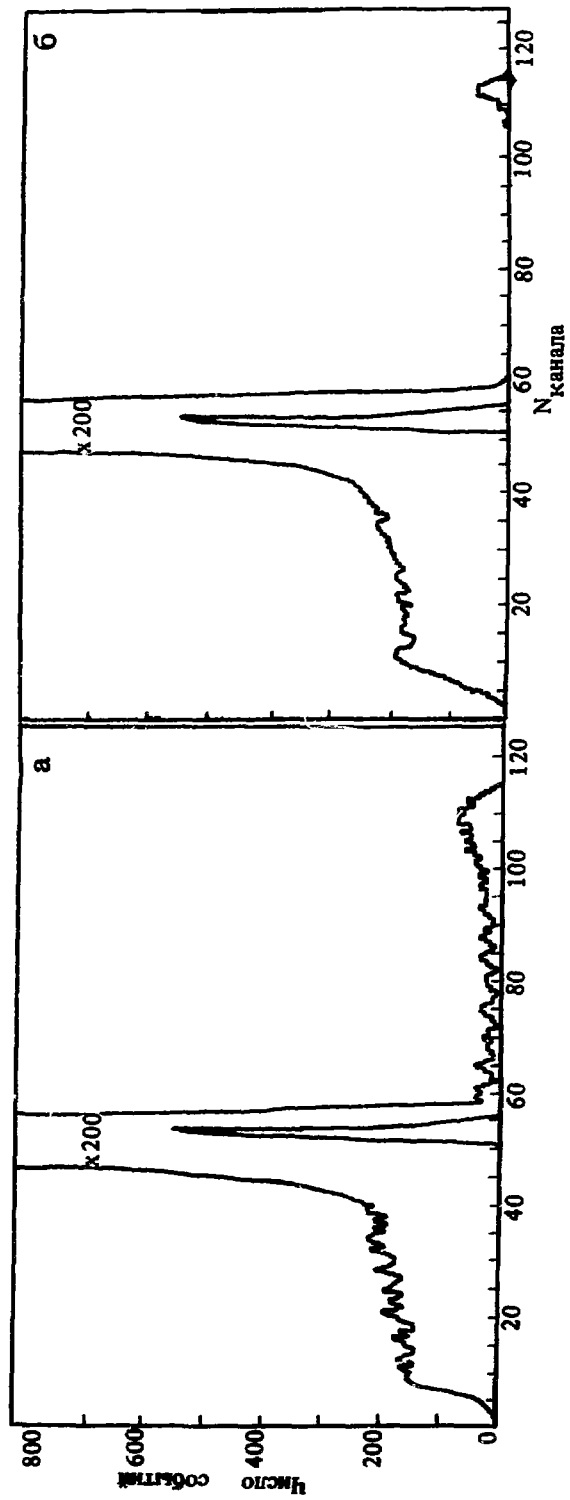


Рис. 8. Спектры упругого рассеяния в реакции ($^{14}\text{N} + \text{Au}$) без РНИ (а) и с включенным РНИ (б)

10^4 имп./с. Полученные данные представлены на рис. 9. Там же для сравнения, приведены счетные характеристики спектроскопического усилителя и переключаемого интегратора 673 фирмы "Ортек" и модуля 571 – усилителя, формирующего импульсы гауссовой формы. По горизонтальной оси отложена входная нагрузка аналогового канала, по вертикальной оси – среднее число импульсов в секунду, разрешенные РНИ для регистрации. Как видно из рис. 9, лучшими счетными характеристиками обладают модуль 673 и блок [6]. Различие их счетных характеристик объясняется различными постоянными времени формирования в усилителе и различным временем работы интегратора. Худшими счетными характеристиками обладает модуль 571. На рис. 10 показана зависимость просчетов, вызванных РНИ при изменении входных нагрузок (кривая 2), вычисленная по формуле:

$$\eta = \left(1 - \frac{\bar{N}_{\text{ВЫХ}}}{\bar{N}_{\text{ВХ}}}\right) \cdot 100\%,$$

где $\bar{N}_{\text{ВЫХ}}$ – нагрузка на выходе РНИ (имп./с); $\bar{N}_{\text{ВХ}}$ – нагрузка на входе РНИ (имп./с).

Как следует из кривой 1 рис. 10, просчеты плавно возрастают при входных нагрузках $4 \cdot 10^4 - 10^5$ имп./с от 3,8 до 40% соответственно. Для сравнения показаны характеристика просчетов для модуля 572 фирмы "Ортек" $\tau_{\text{форм}} \approx 2$ мкс.

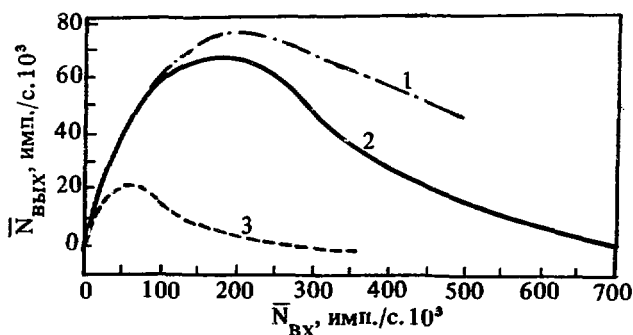


Рис. 9. Счетные характеристики: 1 – модуля 673 фирмы "Ортек"; 2 – усилительного тракта многоканального спектрометра заряженных частиц; 3 – усилителя с гауссовым формированием $T_{\text{инт}} = T_{\text{диф}} = 2$ мкс модуля 572 фирмы "Ортек"

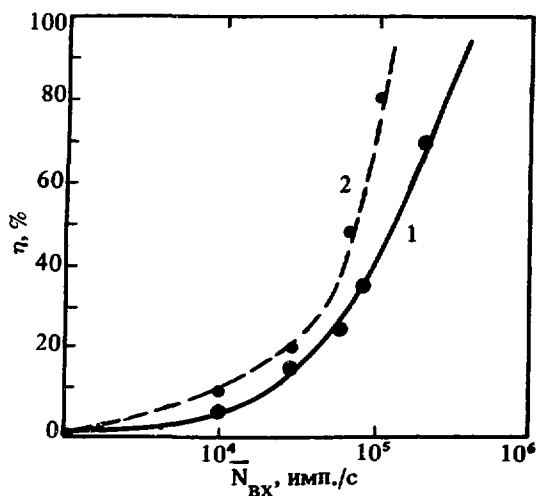


Рис. 10. Зависимость просчетов, вызванных РНИ, от величины входной загрузки: 1 – усилительный тракт многоканального спектрометра заряженных частиц; 2 – модуль 572 фирмы "Ортек" при формировании $T_{\text{инт}} = T_{\text{диф}} = 2 \text{ мкс}$

ВЫВОДЫ

Исследования основных загрузочных характеристик усилительных трактов спектрометров заряженных частиц при высоких входных нагрузках показали, что использование в составе спектрометра спектрометрического блока измерения и обработки сигналов полупроводниковых детекторов [6], содержащего формирующий усилитель, управляемый интегратор, схему ключевого восстановителя базового уровня и режектора наложенных импульсов, позволяет значительно расширить загрузочные возможности спектрометра и тем самым повысить информативность измерений по сравнению с традиционными спектрометрами, использующих в качестве спектрометрических усилителей обычные усилители с активными элементами в формирующих цепях (см. рис. 2, 3). Энергетическое разрешение нашего усилительного тракта ухудшается на 5% при изменении загрузки от 10^3 до 10^5 имп./с, а сдвиг положения монопика имеет незначительное значение даже при нагрузках $3 \cdot 10^5$ имп./с. При обычных способах формирования входных сигналов в спектрометрических усилителях подобные характеристики существенно хуже.

На рис. 4 показаны загрузочные характеристики усилителя 572 фирмы "Ортек", которые показывают, что разрешение при входной нагрузке 10^5 имп./с ухудшается на 18%, а сдвиг монопика при той же нагрузке составляет 35%.

Исследования характеристик РНИ показали высокую его эффектив-

ность и оптимальный выбор схемного разрешения для построения блока [6]. Нами были измерены интервал нечувствительности режектера для различных постоянных времени формирования импульсов в быстром фильтрующем усилителе. Результаты измерения представлены в виде кривой на рис. 5 и в виде спектров в области двойных наложений рис. 6. Эффективность режекции в области между основным монопиком и дважды наложенным составила величину 99,7%.

Измерения, проведенные на пучке ускорителя в реакции $^{14}\text{N} + \text{Au}$, показали, что эффективность режекции в данной области несколько хуже 98%, что объясняется качеством используемых детекторов – временем собирания и дисперсией времени собирания носителей заряда (рис. 8).

Результаты счетных характеристик спектрометра иллюстрируют, что наш усилительный тракт не уступает подобному модулю 673 фирмы "Ортек".

На рис. 9 представлены для сравнения счетные характеристики модуля 673 (1) нашего усилительного тракта (2) и усилительного тракта с использованием модуля 572 фирмы "Ортек". Разница в счетных характеристиках объясняется тем, что нами использованы несколько другие постоянные времени формирования импульсов в усилителе блока [6] ($T_{\text{диф}} = T_{\text{инт}} = 0,4$ мкс) и выбрано большее время интегрирования в управляемом интеграторе ($T_{\text{инт}} = 1,5$ мкс), в то время, как в модуле 673 постоянные времени формирования импульсов в усилителе $T_{\text{диф}} = T_{\text{инт}} = 0,25$ мкс, а время интегрирования $T_{\text{инт}} = 0,5$ мкс.

Рис. 10 показывает зависимость просчетов, определяемых схемой режекции наложенных импульсов от входных загрузок усилительного тракта (1). Там же для сравнения показана зависимость просчетов от входной загрузки спектрометрического тракта, работающего с усилителем типа 572 фирмы "Ортек", формирующем сигналы гауссовой формы с постоянными времени $T_{\text{диф}} = T_{\text{инт}} = 2$ мкс.

Результаты проведенных исследований показали перспективность использования в экспериментах усилительных трактов, содержащих спектрометрические блоки измерения и обработки сигналов полупроводниковых детекторов [6], позволяющие вести измерения на высоких входных нагрузках при незначительном ухудшении разрешения и сдвиге положения энергетических линий в спектрах, высокой эффективности режекции и достаточно низких просчетах по сравнению с обычными спектрометрическими трактами.

Список литературы

1. Современная ядерная электроника. Т. 1. Измерительные системы и устояства. — М.: Атомиздат, 1974.
2. Глушковский М.Е. Методы полного исключения наложений импульсов: обзор. — ПТЭ, 1977, № 3, с. 13.
3. Александров Д.В. и др. Исследование реакций (${}^6\text{Li}$, ${}^8\text{B}$) и (${}^7\text{Li}$, ${}^8\text{B}$) на легких ядрах. — Ядерная физика, 1982, т. 35, вып. 2.
4. Мазуров И.Б., Сибиряк Ю.Г. Спектрометрический генератор импульсов: А.с. 1325671. — Б.И., 1988, № 27, с. 151.
5. Духанов В.И., Жернов Н.В., Мазуров И.Б. Широкополосный зарядово-чувствительный предусилитель. — ВАНТ. Сер. Общая и ядерная физика, 1988, вып. 2 (42), с. 87.
6. Мазуров И.Б., Сибиряк Ю.Г. Спектрометрический блок измерения и обработки сигналов полупроводниковых детекторов. — ПТЭ, 1983, № 4, с. 98.
7. Быстрый фильтрующий усилитель 1501 производства ПНР ИЯХиТ/Фирмы "Полон". — Варшава, 1982.

Редактор Т.И. Титкова
Технический редактор Н.А. Малькова
Корректор Л.В. Пономарева

Подписано в печать 10.03.89. Т-10031. Формат 60x90/16
Печать офсетная. Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,8
Тираж 200. Цена 15 коп. Заказ 160. Индекс 3624

Подготовлено к изданию и отпечатано
в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова
123182, Москва, пл. Академика Курчатова

РУБРИКАТОР ПРЕПРИНТОВ ИАЭ

1. Общая, теоретическая и математическая физика
2. Ядерная физика
3. Общие проблемы ядерной энергетики
4. Физика и техника ядерных реакторов
5. Методы и программы расчета ядерных реакторов
6. Теоретическая физика плазмы
7. Экспериментальная физика плазмы и управляемый термоядерный синтез
8. Проблемы термоядерного реактора
9. Физика конденсированного состояния вещества
10. Физика низких температур и техническая сверхпроводимость
11. Радиационная физика твердого тела и радиационное материаловедение
12. Атомная и молекулярная физика
13. Химия и химическая технология
14. Приборы и техника эксперимента
15. Автоматизация и методы обработки экспериментальных данных
16. Вычислительная математика и техника

Индекс рубрики дается через дробь после основного номера ИАЭ.



Препринт ИАЭ-4849/14. М., 1989

