

7306

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



7306

Экз. чит. зал

13 - 7306

В.С.Александров, Ц.Вылов, Т.М.Муминов,
Б.П.Осипенко, С.И.Орманджиев

ОПТИМИЗАЦИЯ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
НА БАЗЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

1973

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

13 - 7306

В.С.Александров, Ц.Вылов, Т.М.Муминов,
Б.П.Осипенко, С.И.Орманджиев

**ОПТИМИЗАЦИЯ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
НА БАЗЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ**

**Научно-техническая
библиотека
ОИЯИ**

1. Введение

Значительный прогресс, который был достигнут в области ядерной спектроскопии в последние годы, обусловлен созданием полупроводниковых детекторов /п.п.д./, особенности работы и технология изготовления которых подробно описаны в литературе /1-3/. На основании тщательного анализа блоков спектрометров нами построен комплекс аппаратуры для прецизионных измерений спектров излучений радиоактивных нуклидов. Ниже рассматриваются вопросы оптимизации спектрометрической системы.

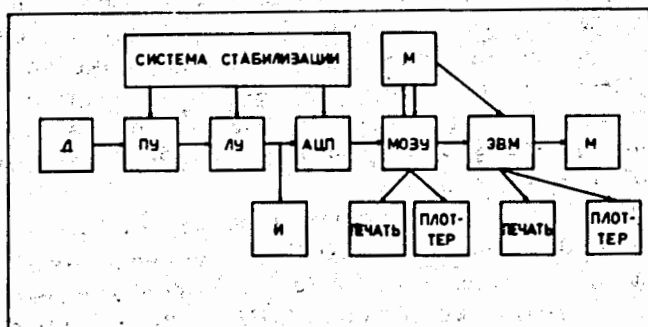


Рис. 1. Блок-схема полупроводникового спектрометра для измерения энергетического распределения ядерных излучений.

Блок-схема полупроводникового спектрометра для измерения энергетического распределения ядерных излучений представлена на рис. 1. Для ослабления зависимости выходного напряжения от емкости детектора C_d , что важно в спектрометрических измерениях, применена

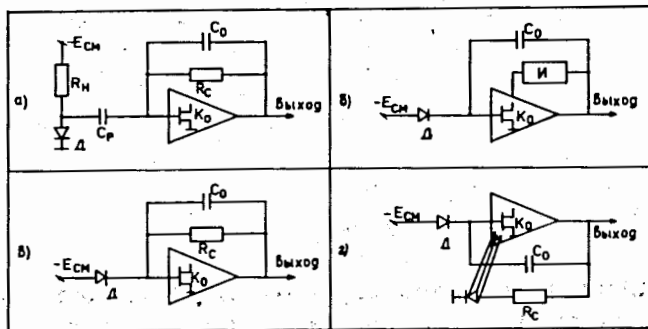


Рис. 2. Зарядочувствительный предусилитель, системы подключения детекторов и осуществления обратной связи /И - интегратор/.

схема предусилителя /ПУ/ с емкостной обратной связью /рис. 2/. На рис. 2 показаны возможные подключения п.п.д. и системы осуществления обратной связи, преимущества и недостатки которых рассмотрены в [3-5]. Назначение спектрометрического усилителя /ЛУ/ сводится к линейному усилению амплитуды выходного сигнала и фильтрации шума п.п.д. и ПУ. В этом блоке находятся формирующие цепи, которые определяют частотные характеристики всего усилительного тракта, заметно влияющие на энергетическое разрешение и загрузочные свойства системы в целом.

От ЛУ сигналы поступают на блок амплитудно-цифрового преобразователя /АЦП/ и многоканального запоминающего устройства /МОЗУ/. Характеристики этих блоков /частота генератора АЦП и время обращения к МОЗУ/ определяют максимальную скорость счета, а иногда и энергетическое разрешение спектрометра /вход АЦП рассчитан на сигнал определенной длительности, и часто оптимальные постоянные формирующих цепей не совпадают с этим значением/. Из МОЗУ информация поступает на ЭВМ, где производится соответствующая ее обработка.

Система стабилизации является вспомогательным блоком, который позволяет проводить длительные измерения. Интенсиметр /И/ применяется для контроля скорости счета /мертвое время системы/.

2. Зависимость энергетического разрешения от элементов спектрометра

Учитывая все источники шума, для зарядочувствительного ПУ и линейного усилителя с однократным CR-RC формированием можно записать [4,6]:

$$\begin{aligned}
 (\Delta E [\text{эВ}])^2 &= [\Delta_{\text{ст}}^2 + \Delta_{\text{тш}}^2 + \Delta_{\text{от}}^2 + \Delta_{\text{соб}}^2]_g + \\
 &+ [\Delta_R^2 + \Delta_{\text{з}}^2 + \Delta_k^2 + \Delta_M^2 + \Delta_{\text{ост}}^2]_{\text{ПУ}} + (\Delta E)_{\text{апп}}^2 \approx \\
 &\approx (2,354 \sqrt{\epsilon E F})^2 + \left(\frac{4,52}{q} \right)^2 \left\{ \frac{0,6}{rS} (C + C_{\text{вх}} + C_0)^2 + 0,15 C_{\text{из}}^2 + \right. \\
 &+ kT \tau \left[\left(\frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_n} \right) + \frac{q}{2kT} (I_g + I_{\text{з}}) \right] + \Delta_M^2 + \Delta_{\text{ост}}^2, \\
 &\quad \left. /1/
 \end{aligned}$$

где $\Delta_{\text{ст}}$ - разрешение, связанное со статистическими флуктуациями образования заряда: F - фактор Фаю; $\Delta_{\text{тш}}$ - разрешение, связанное с тепловыми шумами в п.п.д.; величина теплового шума зависит от сопротивления и температуры кристалла, причем распределение равномерно в полосе частот от 0 до ∞ ; $\Delta_{\text{от}}$ - разрешение, связанное с обратными токами через п.п.д.; эти токи складываются из двух составляющих: объемные /диффузионные и генерационные/ и поверхностные /сильно зависящие от степени окисления, загрязнения и качества обработки кристалла/ токи; $\Delta_{\text{соб}}$ - разрешение, с неоднородностью сбора заряда по объему детектора; Δ_R - разрешение, обусловленное тепловым шумом резисторов, параллельно подключенных к затвору полевого транзистора /ПТ/; тепловой шум распределен равномерно в полосе частот от 0 до ∞ ; $\Delta_{\text{з}}$ - разрешение, обусловленное шумом тока затвора ($I_{\text{з}}$); для кремниевых ПТ при комнатной температуре $I_{\text{з}} \approx 10^{-10} - 10^{-12} [\text{а}]$ и в основном определяется тепловой генерацией носителей в обедненном слое; Δ_k - разрешение, обусловленное тепловым шумом проводящего канала ПТ; согласно Ван-

дер-Зилу /7/ шумы проводящего канала обусловлены шумом сопротивления канала; Δ_M - разрешение, обусловленное микрофонными шумами; $\Delta_{ост}$ - разрешение, связанное с шумом схемы, следующей за входным каскадом / < 12% $\Delta_k^{1/8}$ /, а также флюктуациями, обусловленными связью входного ПТ с остальной частью ПУ /9/; S - крутизна ПТ [a/e]; I_D - обратный ток п.п.д. [a]; $C_{из}$ - емкость затвор - исток ПТ [ϕ]; $C_{вх}$ - емкость на входе ПТ /исключая C_0 и C_d / [ϕ]; τ - постоянная времени формирующих цепей [сек]; $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ [к] - заряд электрона; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ вт.сек/°К - постоянная Больцмана; $(\Delta E)_{апш}$ - энергетическое разрешение всей последующей электроники.

Из выражения /1/ вытекают требования, которые предъявляются к элементам спектрометра:

а/ необходимость охлаждения п.п.д. - I_D уменьшается;

б/ необходимость увеличения величин R_C и R_H / > 10^6 ом/;

в/ необходимость применения ПТ с большой крутизной - отношение C_d/S уменьшается;

г/ необходимость уменьшения C_d /либо за счет площади, либо за счет глубины чувствительного слоя/.

Выражение для оптимальной постоянной формирования удобно получить после представления элементов, генерирующих шум, в виде двух генераторов /параллельного и последовательного шума /10/. Спектральная плотность среднеквадратичного напряжения параллельного шума определяется суммой средних величин шумовых токов детектора, сопротивлений в цепи затвора и тока затвора выражением

$$U_{пар}^2 = \frac{b}{2\pi} \frac{a_1 I_{тш} + a_2 I_{от} + a_3 I_R + a_4 I_э}{C_{\Sigma}^2} \frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{1}{2\pi} \frac{B}{\omega^2} \Delta\omega, \quad /2/$$

где $I_{тш}$, $I_{от}$, I_R , $I_э$ - средние величины шумовых токов детектора, сопротивлений и затвора ПТ; C_{Σ} - суммарная емкость входной цепи, складывающаяся из параллельно подключенных емкостей детектора, емкости

монтажа и приведенной емкости зарядочувствительного ПУ; a_1, \dots, a_4, b - константы.

Спектральная плотность среднеквадратичного напряжения генератора последовательного шума определяется преимущественно шумом канала ПТ /7/ и имеет вид

$$U_{посл}^2 = \frac{a}{2\pi} \frac{M}{S} \left(1 + \frac{C_d^2}{C_{\Sigma}^2}\right) \Delta\omega = \frac{1}{2\pi} A \Delta\omega, \quad /3/$$

где $a = const$; M равняется 0,5 ÷ 0,7 и зависит от режима ПТ.

Тогда оптимальные постоянные формирования $\tau_{опт}$ для однократного и двукратного дифференцирования (m), а также и n -кратного интегрирования при $\tau_{диф} = \tau_{инт}$ равны

$$\tau_{опт \ m=1} = \frac{1}{\sqrt{2n-1}} \sqrt{\frac{A}{B}}, \quad /4/$$

$$\tau_{опт \ m=2} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2n-1}} \sqrt{\frac{A}{B}}. \quad /5/$$

В частности, для $m=1$ и $n=1$ имеем /4/

$$\tau_{опт} [сек] = \left\{ \frac{0,6(C_d + C_{вх} + C_0)^2 + 0,15 C_{из}^2}{S/R_H + S/R_C + (I_D + I_э) S q / 2kT} \right\}^{1/2}. \quad /6/$$

Выбор $\tau_{инт} = \tau_{диф}$ обусловлен оптимальностью по отношению к расчетному разрешающему времени и перегрузкам, хотя при двукратном дифференцировании при этом получается небольшое ухудшение соотношения сигнал/шум /12/.

Если $\tau > \tau_{опт}$, преобладают параллельные шумы, если $\tau < \tau_{опт}$ - последовательные шумы. Понижение параллельных шумов увеличивает $\tau_{опт}$, и при этом улучшается разрешение. Однако в то же время ухудшается нагрузочная характеристика системы, что приводит к уширению линии за счет наложений.

Заметим, что микрофонные шумы являются параллельным источником шумов. Следовательно, их присутствие понижает $\gamma_{\text{опт}}$ и увеличивает минимальное значение шума.

3. Предусилитель

Общая теория проектирования спектрометрических ПУ для работы с п.п.д. обстоятельно изложена в работах /1, 3, 4, 6, 13/, где рассмотрены все источники шума и даны формулы для их расчета.

Схема применяемого нами зарядочувствительного ПУ с резисторной обратной связью приведена на рис. 3^{/13/}. Параметры входного каскада /схема подключения детектора, ПТ, C_0 , R_n , R_c / выбирались конкретно в зависимости от параметров применяемого детектора. Вопросы оптимизации рассматриваются ниже.

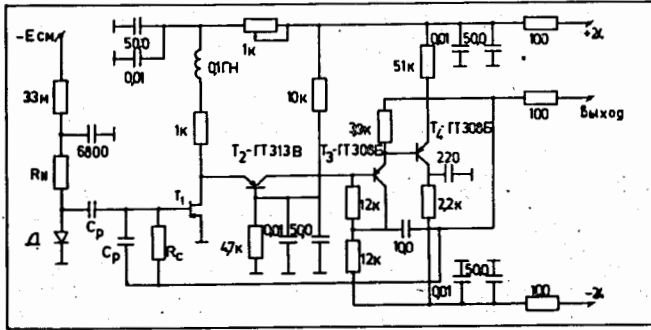


Рис. 3. Принципиальная схема применяемого предусилителя.

4. Линейный усилитель

Теоретический анализ сравнительных характеристик применяемых формирователей импульсов от п.п.д. проведен достаточно полно /1, 3, 10-12/. Принципиальные схемы используемых нами усилителей представлены на рис. 4 и 5.

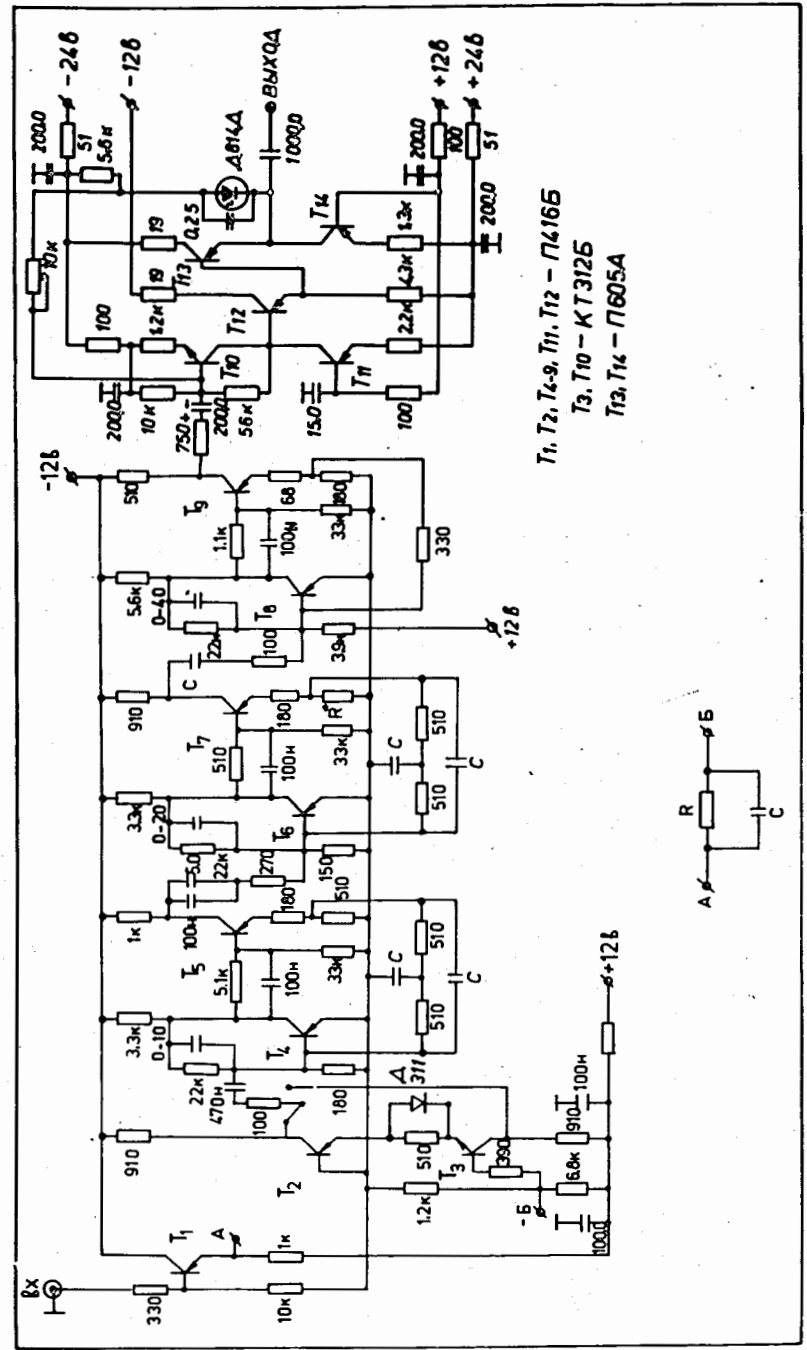


Рис. 4. 1-ая принципиальная схема применяемого линейного усилителя.

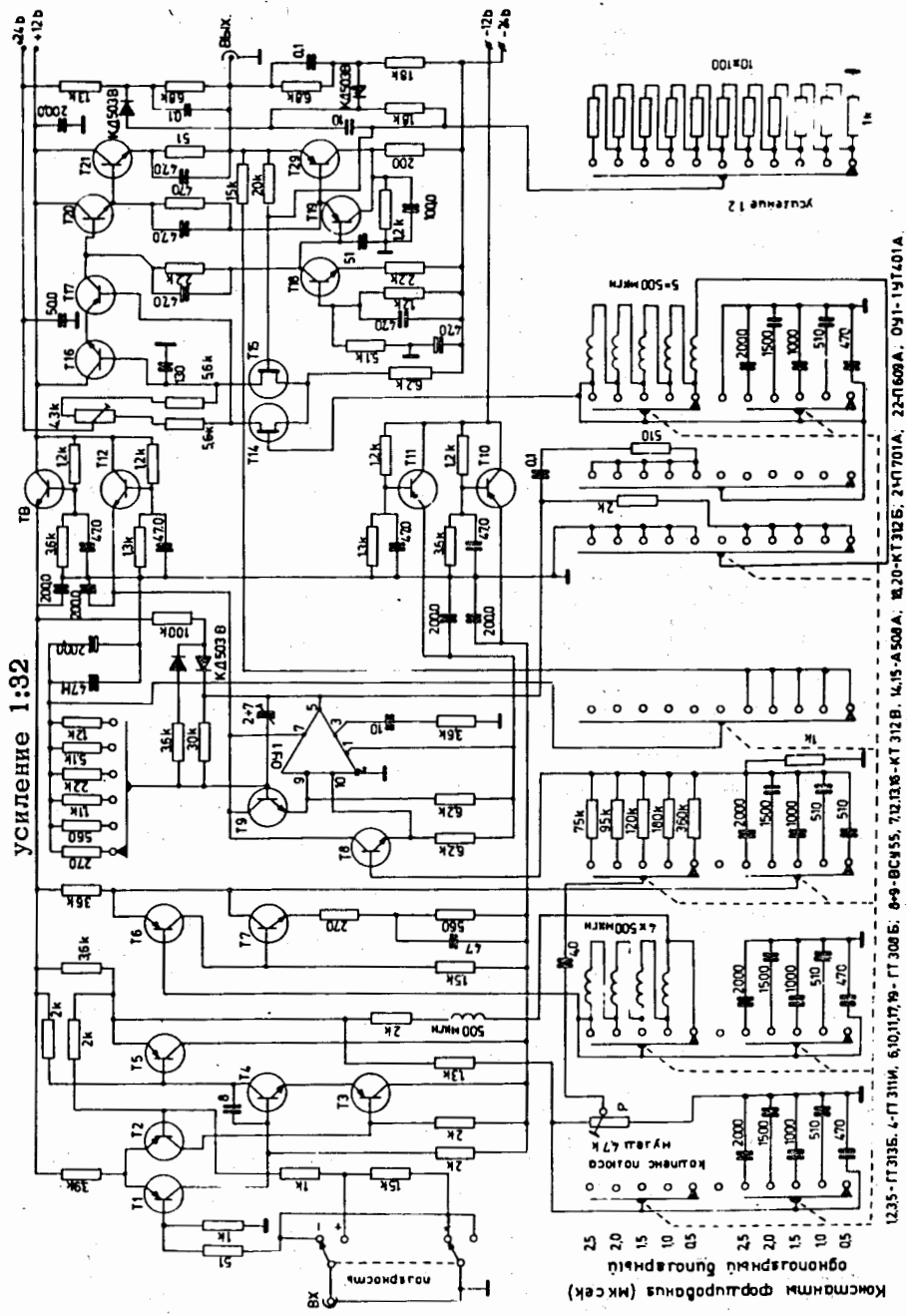


Рис. 5. 2-ая принципиальная схема применяемого линейного усилителя.

Усилитель на рис. 4 является модификацией усилителя /14,15/. Расположение первой дифференцирующей CR-цепи после входной секции уменьшает вероятность наложения импульсов в основных секциях. Резистор R₁ служит для "компенсации полюса нулем", устраняющей выброс обратной полярности при прохождении сигналов с экспоненциальным спадом 50-500 мксек через первый фильтр. На входе же расположен инвертор, позволяющий получить выходные сигналы обеих полярностей. В схеме применено формирование квазигауссовского типа, которое реализуется комбинацией дифференцирующей RC-цепочки с n-каскадным интегратором на активных фильтрах. Переключатель второго дифференцирования расположен за формирующими секциями.

В схеме на рис. 5 каскад первого дифференцирования импульса с "компенсацией полюса нулем" подключен после усилителя-фазоинвертора и каскада интегрирования на RLC-контуре /16/. Далее идет усилитель с регулируемым коэффициентом усиления и второй RLC-контур. Этот контур подключается либо как интегратор, либо как каскад однократного дифференцирования и однократного интегрирования, что дает большой коэффициент передачи цепи /17/ и соответственно уменьшение приведенного ко входу шума усилителя. Оконечный каскад охвачен глубокой обратной связью, что определяет малую нелинейность и низкоомный выход. Поскольку один RLC-контур эквивалентен двум интегрирующим CR-цепям /18/, то при однократном дифференцировании кратность интегрирования равна 4, а при двукратном дифференцировании - 3. Эта кратность достаточно близка к оптимальной /11/.

5. Оптимизация системы детектор-предусилитель

В зависимости от конкретной физической задачи /вид регистрируемых частиц, требования к эффектив-

энергетического разрешения /для уменьшения C/S /1// нужно применять ПТ с большой крутизной; так как при энергии больше 500 кэв основной вклад в энергетическое разрешение дает детектор ($\Delta_{СТ}$), для регистрации высокоэнергетических γ -квантов не требуется охлаждения ПТ. Величины элементов входного каскада приведены в табл. 1.

Зависимость энергетического разрешения и эффективности от параметров $Ge(Li)$ -детекторов показана в /19/.

$$v/C_d \geq 5 \text{ нф}; I_d \approx 10^{-6} \text{ а}$$

Этот случай реализуется в работе с кремниевыми детекторами при комнатной температуре - детекторы №№ 11, 13 /табл. 1/. В силу большого значения I_d здесь нельзя получить высокое энергетическое разрешение. Схема подключения п.п.д. и ПУ представлена на рис. 2а, а характеристики ПУ - в табл. 1. В качестве примера на рис. 7 приведены спектр конверсионных электронов ^{207}Bi и спектр α -частиц $^{241}Am + ^{239}Pu + ^{244}Cm$, снятый с помощью $Si(Au)$ -детекторов.

6. Заключение

На базе проведенного анализа элементов и блоков спектрометрической системы создан комплекс аппаратуры для измерения энергетического распределения излучений радиоактивных нуклидов. Простое и надежное решение электронных схем позволило получать стабильные спектрометрические характеристики хорошего качества. За время эксплуатации аппаратуры /более двух лет/ выполнены исследования свойств ряда радиоактивных нуклидов в области лантанидов и актинидов.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить проф. К.Я.Громова и кандидата физико-математических наук В.Г.Калиникова за постоянный интерес к настоящей работе, а также Я.Юрковского, Д.Срнка, В.Г.Сандуковского, Й.Крацкову, Л.А.Пермякову и Е.Береги за изготовление детекторов.

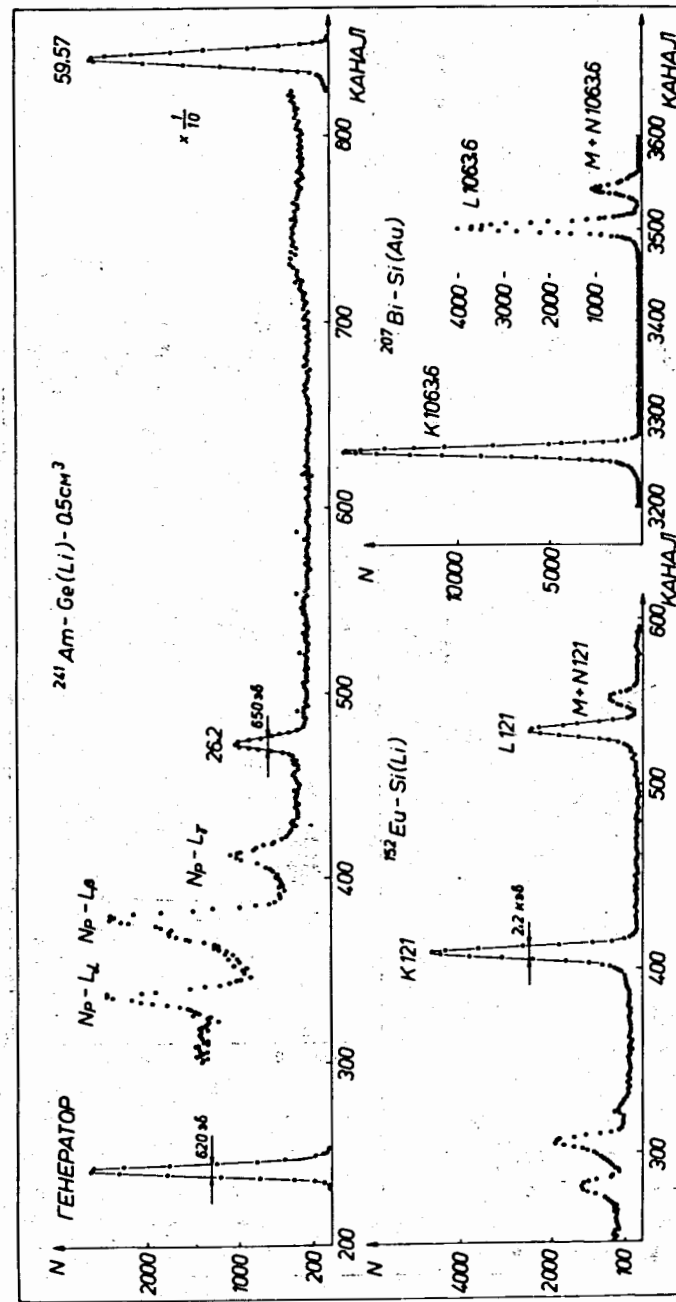


Рис. 6. Спектры γ -лучей ^{241}Am и конверсионных электронов ^{207}Bi , измеренные с помощью полупроводниковых детекторов при оптимальной температуре.

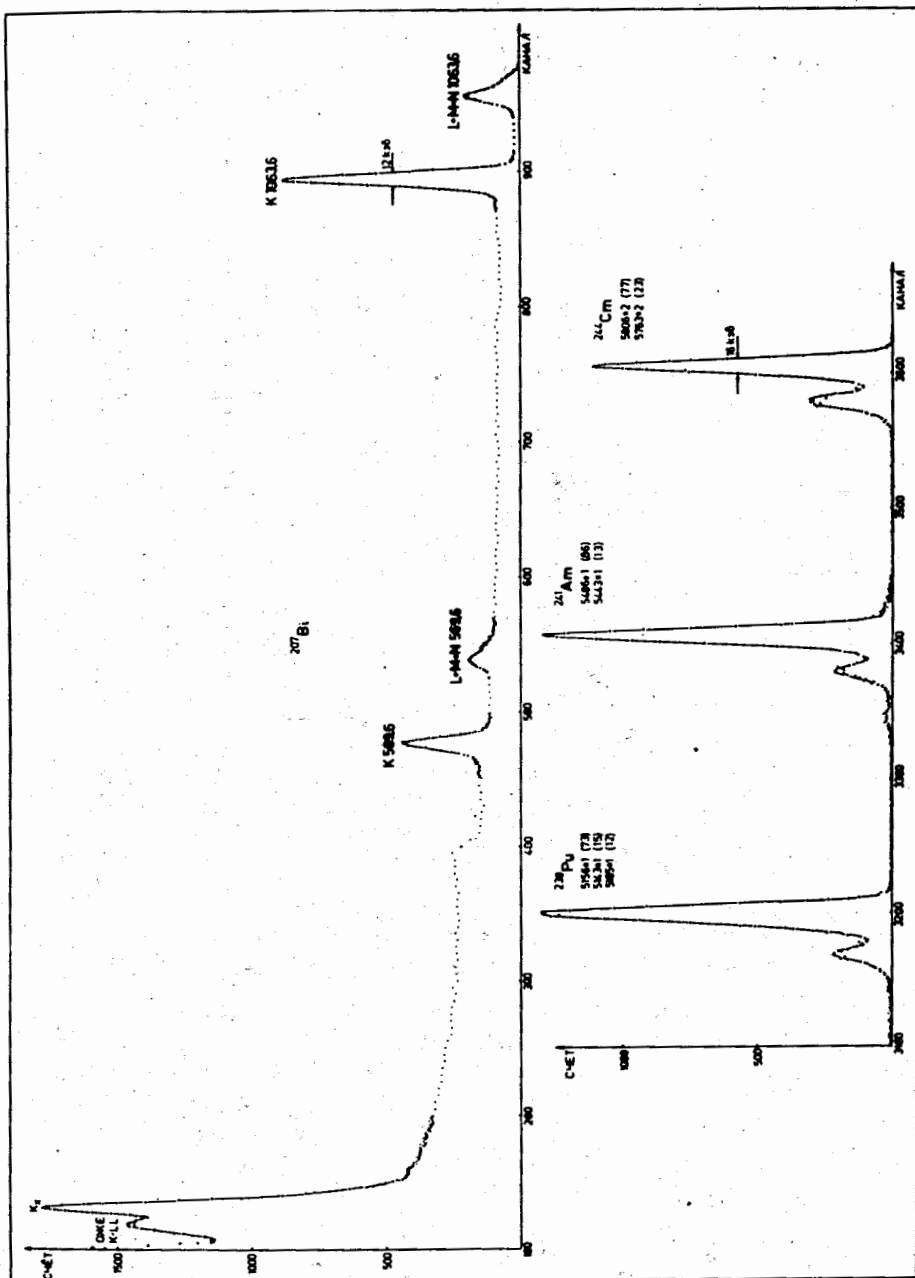


Рис. 7. Спектры конверсионных электронов ^{207}Bi и α -частиц ^{239}Pu , ^{241}Am и ^{244}Cm , измеренные с помощью полупроводниковых детекторов при комнатной температуре.

Литература

1. Ю.К. Акимов. Полупроводниковые детекторы ядерных излучений и их применение. Атомиздат, 1967.
2. G. Bertolini, A. Coche. *Semiconductor Detectors*, Amsterdam, 1968.
3. С.А. Балдин, Л.М. Иоанесянц. *ПТЭ*, №1, 7, 1972.
4. E. Elad. *Proc. Ispra Nucl. Electronics Symp.*, p. 21, 1969.
5. E. Elad. *IEEE Trans. NS-19*, No. 1, 403, 1972.
6. Б.В. Фефилов. *ОИЯИ*, 13-3101, Дубна, 1967.
7. Van der Ziel. *Proc. IRE*, 50, 1848, 1962.
8. В.Г. Субботин. *ОИЯИ*, 13-4503, Дубна, 1969.
9. Н.Я. Седов. *ПТЭ*, №6, 108, 1971.
10. А.Б. Джиллеси. *Сигнал, шум и разрешающая способность усилителей*. Атомиздат, 1964.
11. С.И. Орманджиев. *ОИЯИ*, P13-6219, Дубна, 1972.
12. С.Р. Аврамов, С.И. Орманджиев. *ОИЯИ*, 6-6603, Дубна, 1972.
13. I.L. Blankenship. *IEEE Trans.*, NS-11, No. 3, 1964.
14. Т. Лакатош. *ОИЯИ*, 13-4161, Дубна, 1968.
15. E. Fairstein, I. Hahn. *Nucleonics*, 23, No. 11, 1965.
16. С.И. Орманджиев. *ОИЯИ*, D13-6210, Дубна, 1972.
17. С.И. Орманджиев. *ОИЯИ*, 13-6812, Дубна, 1972.
18. С.И. Орманджиев. *ОИЯИ*, P6-6052, Дубна, 1971.
19. Ц. Вылов, И.Н. Егшин, М.Г. Маринов, Т.М. Муминов, Б.П. Осипенко, В.Г. Сандуковский, Д. Срна, Я. Юрковски. *ОИЯИ*, P13-6759, Дубна, 1972.
20. Е. Береги, Ц. Вылов, И. Крацикова, Ли Чен Сон, Б.П. Осипенко, Л.А. Пермякова, В.Г. Тишин. *ОИЯИ*, P13-6830, Дубна, 1972.
21. TRIDAC-C - specifications and operation, intertechnique, 1971.
22. Э.Г. Имаев и др. *ОИЯИ*, P10-3332, Дубна, 1967.
23. Ц. Вылов, И.Н. Егшин, С. Орманджиев, Б.П. Осипенко, Д. Срна, Я. Юрковски. *ОИЯИ*, 13-6440, Дубна, 1972.
24. Ц. Вылов, В.В. Кузнецов, Б.П. Осипенко, Д. Срна, Я. Юрковски. *ПТЭ*, №1, 75, 1973.

Рукопись поступила в издательский отдел
12 июля 1973 года.