

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

K-172

13 - 7902

КАЛИНИН Анатолий Иванович

ИССЛЕДОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ  
МАЛОШУМЯЩИХ ПРЕДУСИЛИТЕЛЕЙ  
ДЛЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ  
ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Специальность 05.11-10 - приборы  
для измерения иоизирующих излучений  
и рентгеновские приборы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Дубна 1974

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель  
доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

Ю.К.АКИМОВ.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук

А.П.ЦИТОВИЧ,

кандидат технических наук

И.С.КРАШЕНИННИКОВ.

Ведущее научно-исследовательское учреждение -  
Ереванский физический институт, г.Ереван.

Автореферат разослан " " \_\_\_\_\_ 1974 г.

Защита диссертации состоится " " \_\_\_\_\_ 1974 г.  
в \_\_\_\_\_ час. на заседании Ученого совета Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований, г.Дубна, Московской области, Лаборатория ядерных проблем ОИЯИ, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета  
кандидат физико-математических наук

И.А.БАТУСОВ

13 - 7902

КАЛИНИН Анатолий Иванович

ИССЛЕДОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ  
МАЛОШУМЯЩИХ ПРЕДУСИЛИТЕЛЕЙ  
ДЛЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ  
ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Специальность 05.11-10 - приборы  
для измерения ионизирующих излучений  
и рентгеновские приборы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

Полупроводниковые детекторы ядерных излучений нашли весьма широкое применение в ядерной физике, медицине, геологии и других областях науки и техники. Энергетическое и временное разрешения спектрометров с полупроводниковыми детекторами в значительной степени определяются шумовыми свойствами используемых усилительных схем, поэтому разработка малошумящих предусилителей представляется весьма актуальной проблемой. Хотя за последние годы достигнуты большие успехи как в технологии изготовления малошумящих транзисторов, так и в схемотехнике, тем не менее некоторые вопросы конструирования спектрометрических предусилителей и усилителей разработаны недостаточно. Например, в вопросах построения входных схем, наиболее ответственных за результирующие шумовые характеристики спектрометрических усилителей, в литературе нет единого мнения, поэтому иногда применяются недостаточно обоснованные схемы. Не исследована в значительной степени и не менее важная проблема одновременного получения энергетической и временной информации при регистрации ядерных излучений. В последнее время в основном усилителе широко применяются новые формирующие цепи с использованием активных фильтров. Таких фильтров известно довольно много, однако их возможности в спектрометрических усилителях изучены мало.

Данная диссертация посвящена этим и некоторым другим вопросам конструирования малошумящих предусилителей. Диссертация состоит из введения и пяти глав.

В первой главе дается краткая сводка способов выражения шумовых свойств усилительных элементов и усилителей в целом. Предлагается простой способ измерения собственного разрешения предусилителя при помощи генератора заряда<sup>/16,24/</sup>, позволяющий быстро

определять шумовые параметры предусилителя по изображению выходного импульса и шумовой дорожки на экране осциллографа, не используя детектор и анализатор. Вводится понятие зарядовой спектральной плотности, которая характеризует приведенный ко входу шумовой заряд, но не интегральный по частотному диапазону, каким обычно оценивают спектрометрические предусилители, а дифференциальный. Измеряемая на практике зависимость шума от постоянной времени формирования  $\tau$  есть некоторое приближение к зарядовой спектральной плотности. Однако при изменении постоянной времени формирования частотная полоса не сохраняется постоянной, в результате шум типа " $\frac{1}{f}$ " вообще не зависит от  $\tau$ . Зарядовая спектральная плотность измеряется при постоянной и узкой полосе пропускания и поэтому дает более тонкую спектральную картину шумов.

Далее приводится краткая характеристика шумовых свойств различных усилительных элементов, рассматриваются возможности зарядочувствительного предусилителя на параметрическом принципе усиления<sup>/22/</sup>. Особое внимание уделяется изучению шумовых свойств полевых транзисторов при охлаждении. В широком температурном диапазоне измерена серия отечественных и зарубежных транзисторов<sup>/23/</sup>. Предлагается специальная конструкция для одновременного охлаждения и измерения четырех транзисторов, позволяющая существенно сократить время, необходимое для отбора полевых транзисторов.

Глава вторая посвящена исследованию шумовых свойств входных каскадов предусилителей, в частности, рассматривается шумовой вклад второго каскада при различных схемах включения первого каскада<sup>/16, 18/</sup>. Во многих работах классической радиотехники показано, что коэффициент шума не зависит от способа включения первого каскада, однако этого нельзя сказать о шумовых свойствах входных каскадов

предусилителей для полупроводниковых детекторов. При высокоомном источнике сигнала, каким является полупроводниковый детектор ядерных излучений, более существенно влияние входных шумовых источников, кроме того, заметный шумовой вклад вносят вторые и даже третьи каскады. Это видно из приведенного расчета эквивалентных шумовых сопротивлений для трех схем, в каждой из которых вторые и последующие каскады одинаковы, а первые каскады включены соответственно схеме с общим истоком, затвором, стоком. Формулы, описывающие результирующие параллельные и последовательные шумовые сопротивления для этих трех, а также для каскадной схемы входного каскада сведены в таблицу I, где приняты следующие обозначения:  $R_g, R_s$  - эквивалентные параллельное и последовательное шумовые сопротивления;  $S$  - крутизна полевого транзистора;  $\mu$  - коэффициент усиления полевого транзистора;  $C_{зс}, C_{зи}$  - емкости затвор-сток, затвор-исток;  $C$  - суммарная емкость на входе схемы;  $R_c$  - стоковый резистор;  $R_u$  - истоковый резистор.

Наиболее предпочтительным является включение первого каскада по схеме с общим истоком. Схема с общим затвором (базой) имеет повышенный параллельный шум, а схема с общим стоком - повышенный последовательный шум. Каскадная схема по шумовым свойствам несколько хуже, чем два каскада с общим истоком, если нагрузка каскадной схемы не очень высокоомная. Это ухудшение особенно заметно на высоких частотах.

Схемотехника малошумящих зарядочувствительных предусилителей рассматривается в третьей главе диссертации, где сделана попытка систематизировать многочисленные известные схемы зарядочувствительных предусилителей. При помощи матричного метода<sup>/28/</sup> для ряда широкоиспользуемых схем рассчитаны коэффициент усиления с разомкну-

Таблица I  
 Эквивалентные шумовые источники двух первых каскадов

Схема включения первых каскадов	Эквивалентная параллельная шумовая проводимость	Эквивалентное последовательное шумовое сопротивление
ОИ + ОЗ	$\frac{1}{R_{g_1}}$	$R_{S_1} + \left( \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_{g_2}} \right) \frac{1}{S_1^2} + R_{S_2} \left( \frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{S_1 R_c} + \frac{C_{зс}}{C} \right)^2$
ОЗ + ОЗ	$\frac{1}{R_{g_1}} + \frac{1}{R_u} + \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_{g_2}}$	$R_{S_1} + \left( \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_{g_2}} \right) \frac{1}{S_1^2} + R_{S_2} \left( \frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{S_1 R_c} + \frac{1}{j\omega C R_c} \right)^2$
ОС + ОЗ	$\frac{1}{R_{g_1}}$	$R_{S_1} + \left( \frac{1}{R_u} + \frac{1}{R_{g_2}} \right) \frac{1}{S_1^2} + R_{S_2} \left( 1 + \frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{S R_u} - \frac{C_{зу}}{C} \right)^2$
ОИ + ОЗ /каскадное включение/	$\frac{1}{R_{g_1}}$	$R_{S_1} + \left( \frac{1}{R_{c_1}} + \frac{1}{R_{g_2}} + \frac{1}{R_{c_2}} + \frac{1}{R_{g_3}} \right) \frac{1}{S_1^2} + R_{S_2} \left( \frac{1}{\mu_1} + \frac{C_{зс}}{C} + \frac{1}{S_1 R_{c_1}} \right)^2$

той цепи обратной связи, выходное сопротивление и другие параметры, в частности, рассмотрены схемы с положительной обратной связью /29, 30/, позволяющие получить большой коэффициент усиления и высокую стабильность зарядочувствительности.

В четвертой главе диссертации анализируются формирующие цепи основного усилителя. Рассмотрены теоретические формирующие цепи, обеспечивающие максимально возможное отношение сигнала к шуму при заданных величинах сигнала и шумовых источников на входе зарядочувствительного предусилителя.

Получены формулы, описывающие форму выходного сигнала при теоретическом формировании /18/. Рассчитаны зависимости нормированного шума от длительности выходного импульса на уровне 0,1% от максимальной амплитуды для различных схем формирования:

$CR + RC$ ,  $CR + 4RC$ ,  $CR + 6RC$ , для гауссовской, треугольной и теоретической форм импульсов (см. рис. I).

Проведен сравнительный анализ различных формирующих цепей с активными фильтрами, в частности, рассмотрена схема интегрирующего фильтра, состоящая из двух пассивных  $RC$ -звеньев и неинвертирующего активного фильтра на основе операционного усилителя /26/. С помощью ЭВМ рассчитаны оптимальные величины элементов схемы, соответствующие минимальным нормированному шуму и длительности импульса. Из рис. I видно, что данная схема формирования

$CR + 2RC + AC$  примерно эквивалентна случаю шестикратного интегрирования на  $RC$ -фильтрах.

Практические разработки малозумящих предусилителей и их применения в физических экспериментах описаны в пятой главе диссертации.

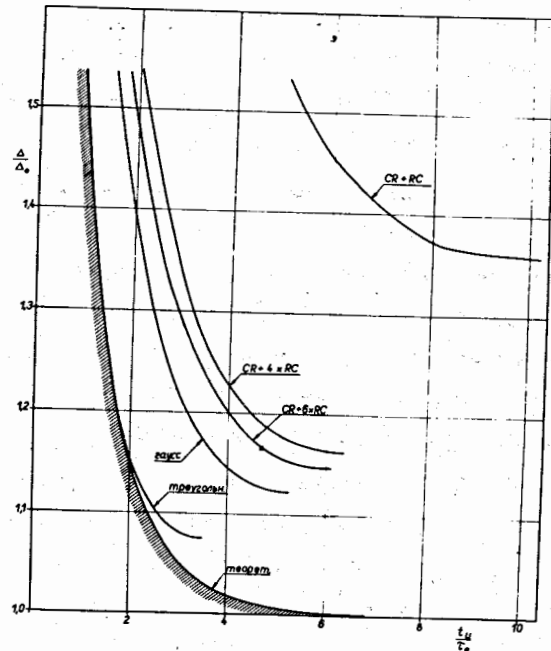


Рис. 1. Зависимость нормированного шума при разных способах формирования от длительности импульса. (Длительности гладких импульсов рассчитаны на уровне 0,1% максимальной амплитуды, включая начало и конец гауссовского импульса).

Крестик X соответствует формированию с активным фильтром  $CR + 2 \times RC + AF$ , рассчитанному автором и примененному в работе [25].

С участием автора были выполнены первые методические и физические работы с полупроводниковыми детекторами на ускорителях высоких энергий, в том числе проведены исследования упругого  $pp$ - и  $pd$ -рассеяния на малые углы при энергии 4 Гэв на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ [10, 11].

Для изучения упругого  $ep$ - и  $ed$ -рассеяния на электронном ускорителе Бревянского физического института разработан зарядочувствительный предусилитель, выходная амплитуда которого слабо зависит от емкости детектора вплоть до  $(1000+3000)$  пф [24]. В этом эксперименте [4] полезные сигналы, соответствующие протонам и дейтонам с энергией 3–20 Мэв, регистрировались на интенсивном фоне от углеродных ядер в диапазоне от 0 до 0,5+1 Мэв. Для устранения этого фона использовался линейный дискриминатор, способный работать с высокими нагрузками до  $1,5 \cdot 10^5$  имп/сек.

Наиболее жесткие требования по уровню шума, стабильности усиления и нагрузочной способности предъявляются к предусилителям для  $\beta$ -,  $\gamma$ - и рентгеновских спектрометров. В 1968 году автором разработан зарядочувствительный предусилитель с полевым транзистором на входе для  $\gamma$ -спектрометра [2, 19]. С  $Ge(Li)$ -детектором объемом  $6,3 \text{ см}^3$  было получено энергетическое разрешение 2 кэв в области низких энергий, что относилось к лучшим результатам в стране. Улучшив схему предусилителя и применяя более совершенные транзисторы, мы получили энергетическое разрешение 1,9 и 2,5 кэв на линиях 120 кэв и 1,3 Мэв с детекторами большого объема ( $V = 41 \text{ см}^3$ ).

Известно, что наиболее высокое энергетическое разрешение может быть получено в условиях, когда полевой транзистор охлаждается в криостате вместе с детектором. Существенный шумовой вклад в

таких спектрометрах приходится на резистор смещения полевого транзистора.

Один из способов работы без резистора смещения – использование обратной связи с выхода зарядочувствительной секции на сток полевого транзистора. При этом используется эффект увеличения тока затвора с ростом напряжения на стоке, наблюдаемый в охлажденных полевых транзисторах. В первой публикации на эту тему<sup>/32/</sup> была указана лишь блок-схема устройства. Автором диссертации разработаны конкретные схемы предусилителей со стоковой обратной связью<sup>/25/</sup>. В схеме, показанной на рис. 2, нагрузкой полевого транзистора по постоянному току служит коллекторно-базовый переход биполярного транзистора. При этом происходит самостабилизация режима полевого транзистора. Например, при увеличении обратного тока детектора ток полевого транзистора уменьшается, токовая нагрузка создает повышение напряжения на стоке, а это в свою очередь за счет указанного выше эффекта увеличивает ток затвора и отрицательное смещение на затворе уменьшается. Последующие каскады предусилителя обеспечивают большой коэффициент усиления с разомкнутой цепью обратной связи ( $K \geq 5000$ ) и высокую стабильность зарядочувствительности.

Разработанный предусилитель без резистора обратной связи позволил получить с  $Si(Li)$ -детектором энергетическое разрешение 290 эв на линии 6,4 кэв (см. рис. 3) при квазигауссовском формировании с  $\tau = 2$  мксек.

На основе исследований, выполненных в главах II, III, разработан предусилитель<sup>/5/</sup>, позволяющий получать одновременно амплитудную и временную информацию о ядерном излучении. Временной канал практически не вносит дополнительных шумов в амплитудный канал, поэтому предусилитель может использоваться для точных спектромет-



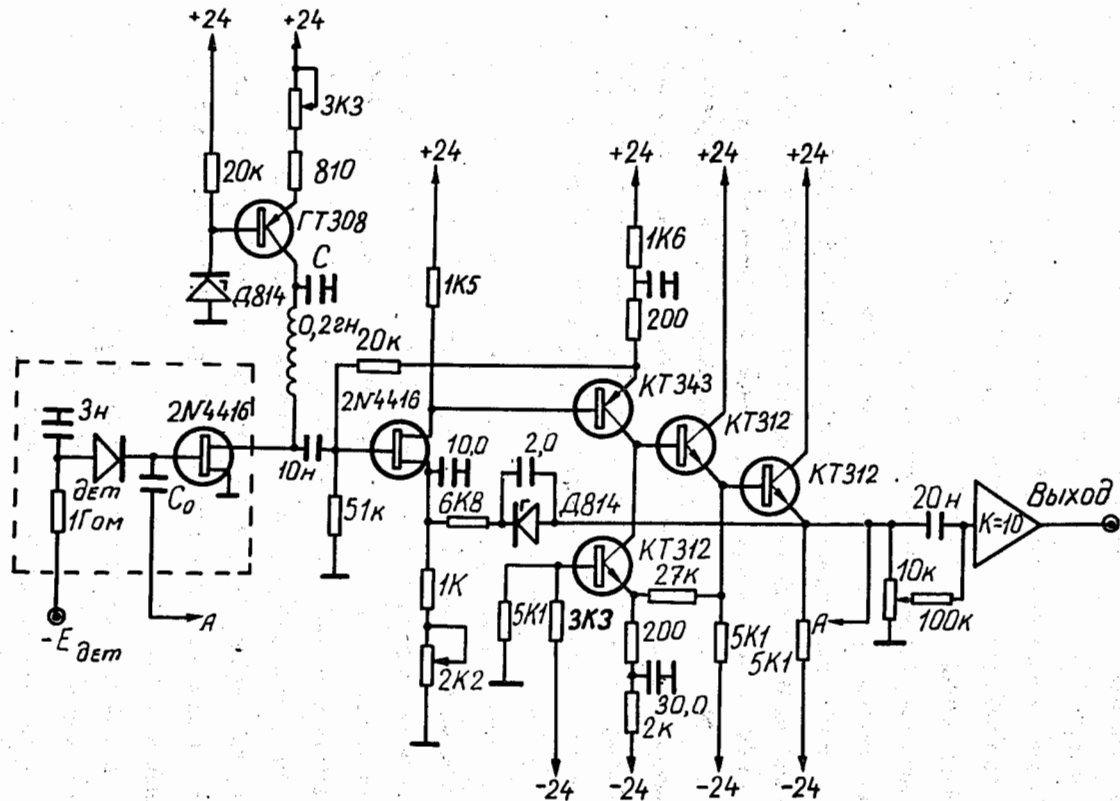


Рис. 2. Предусилитель с токовой нагрузкой полевого транзистора.

рических измерений с  $Ge(Li)$ -детекторами. Собственное разрешение предусилителя не хуже  $0,9 \text{ кэв} + 0,03 \text{ кэв/пФ} \cdot C_{(пФ)}$  (в германиевом эквиваленте), коэффициент усиления с разомкнутой обратной связью не менее 5000, максимальная выходная амплитуда при сопротивлении нагрузки более 1 ком  $\pm 10 \text{ в}$ .

Для временного выхода коэффициент усиления - не менее 200, время нарастания - не более 2,5 нсек, длительность выходного импульса -  $8+500$  нсек, максимальная выходная амплитуда  $\pm 1 \text{ в}$ . Весь предусилитель смонтирован в корпусе с размерами  $80 \times 35 \times 140 \text{ мм}$ . При регистрации совпадений от  $Co^{60}$  между импульсами германиевого детектора ( $V = 1,9 \text{ см}^3$ ) и сцинтилляционного счетчика, составленного из фотоумножителя XP1021 и стибена, разрешающее время для узкого диапазона энергий около 50 и 1330 кэв составило, соответственно, 15,6 и 1,1 нсек. Эти результаты находятся на уровне лучших опубликованных достижений.

Предусилитель использовался также для изучения деления тяжелых ядер, вызванного безрадиационными переходами  $J/\psi$ -мезонов<sup>6/</sup>, при этом в ионизационной камере регистрировались осколки деления на фоне большого числа  $\alpha$ -распадов ( $10^6 + 10^7$  имп/сек). При такой высокой загрузке амплитудная информация снималась только с временного выхода предусилителя. При длительности выходного импульса 8 нсек шум (в кремниевом эквиваленте) составил 50-60 кэв.

Предусилитель с энергетическим и временным выходами удобно использовать для изучения формы импульса тока полупроводниковых и других детекторов.

Основные выводы диссертации можно сформулировать следующим образом:

I. Обобщены и развиты теоретические представления о шумовых свойствах усилительных приборов (элементов) и методика их измерения. В частности:

а) предложен простой способ измерения шумовых свойств предусилителей (или отдельных транзисторов) при помощи генератора заряда;

б) введено понятие зарядовой спектральной плотности и показана целесообразность ее измерения;

в) рассчитаны шумовые свойства параметрических видеоусилителей и показаны их возможности;

г) предложена конструкция для одновременного измерения 4-х охлаждаемых полевых транзисторов, позволяющая существенно сократить время, необходимое для отбора транзисторов с минимальными шумами.

II. Проведен систематический анализ шумовых свойств зарядочувствительных предусилителей при различных способах включения первого каскада. При этом показано, что:

а) предпочтительным является включение первого каскада по схеме с общим истоком. Схема с общим затвором (базой) имеет повышенный параллельный шум, а схема с общим стоком - повышенный последовательный шум;

б) каскодная схема по шумовым свойствам несколько хуже, чем два каскада с общим истоком, если нагрузка каскодной схемы не очень высокоомная. Это ухудшение особенно заметно на высоких частотах.

Ш. При помощи матричного метода проведен сравнительный анализ наиболее распространенных схем зарядочувствительных предусилителей, при этом некоторые схемы рассчитаны впервые.

IV. Систематизирован и развит материал о формирующих цепях спектрометрических усилителей:

а) получены точные выражения, описывающие форму выходного сигнала и отношение сигнала к шуму для случая теоретических формирующих цепей, обеспечивающих максимально возможное отношение сигнала к шуму при заданном времени максимума выходного импульса и при заданной длительности импульса;

б) в качестве критерия нагрузочной способности (при данном формировании) введена длительность импульса на уровне 1% от максимальной амплитуды;

в) вычислены зависимости нормированного шума от длительности выходного импульса на уровне 0,1% максимальной амплитуды для различных схем формирования:  $CR+RC$ ,  $CR+4RC$ ,  $CR+6RC$ , для гауссовской и треугольной форм импульсов;

г) проведено сравнение известных квазигауссовских формирующих цепей с использованием активных фильтров,  $RC$ - и  $RLC$ -звеньев.

С помощью ЭЕМ рассчитана практическая схема формирования, состоящая из активного фильтра на основе операционного усилителя и двух пассивных  $RC$ -звеньев, примерно эквивалентная шестикратному интегрированию на  $RC$ -цепях.

V. Разработан комплекс спектрометрических устройств для работы с полупроводниковыми детекторами, включающий в себя:

а) оригинальный предусилитель для одновременного измерения энергии и времени прихода ядерной частицы, имеющий второй выход

со временем нарастания  $2+2,5$  нсек. По шумовым характеристикам предусилитель не уступает, а по быстродействию превосходит зарубежные фирменные образцы. При использовании этого предусилителя для временных измерений с германиевым детектором объемом  $1,9 \text{ см}^3$  достигнуто временное разрешение  $1,1$  нсек при регистрации гамма-квантов с энергией  $E_\gamma = 1,3$  Мэв и  $15,6$  нсек при  $E_\gamma = 50$  кэв, что находится на уровне лучших опубликованных достижений;

б) гамма-спектрометры на основе  $Ge(Li)$ -детекторов, разработанные для исследований по программе ЯСНАПП (ядерная спектроскопия на пучках протонов): с энергетическим разрешением  $2$  кэв на линии  $E_\gamma = 52$  кэв ( $^{169}Yb$ ) с детектором объемом  $6,3 \text{ см}^3$  (1968 г.); с разрешением  $1,9$  кэв на линии  $E_\gamma = 120$  кэв ( $^{57}Co$ ) и  $2,5$  кэв на линии  $E_\gamma = 1,3$  Мэв ( $^{60}Co$ ) с детектором объемом  $41 \text{ см}^3$  (1972 г.);

в) рентгеновские спектрометры на основе  $Si(Li)$ -детекторов, использующие впервые разработанные предусилители со стоковой обратной связью. Получено энергетическое разрешение  $290$  эв на линии  $6,4$  кэв ( $^{57}Co$ ) с детектором площадью  $20 \text{ мм}^2$  и глубиной чувствительного слоя  $3 \text{ мм}$ ;

г) с участием автора разработана основная аппаратура и проведены эксперименты по изучению упругого  $ep$ - и  $ed$ -рассеяния на малые углы на электронном ускорителе Ереванского физического института.

В основу диссертации положены работы, доложенные на международном симпозиуме по наносекундной технике (Дубна, 1967)<sup>/1/</sup>, на XVII ежегодном совещании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Рига, 1968 г.)<sup>/2/</sup>, на симпозиуме по клинической

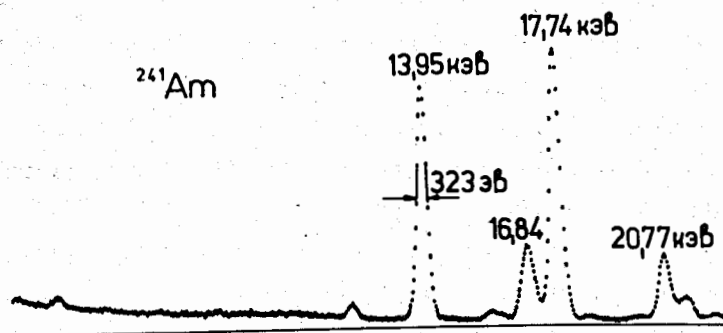
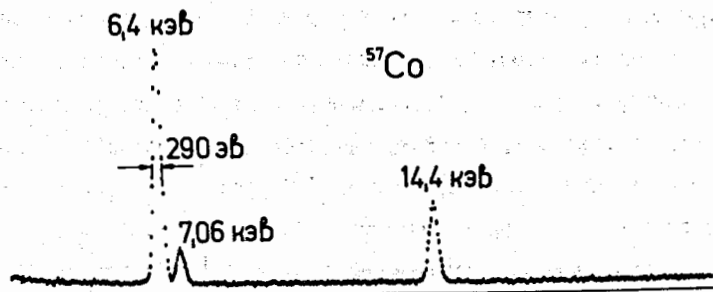


Рис.3. Спектры  $^{57}\text{Co}$  и  $^{241}\text{Am}$ .

дозиметрии (Ленинград, 1969 г.)<sup>/3/</sup>, на международной конференции по физике элементарных частиц (Киев, 1970 г.)<sup>/4/</sup>, на международном симпозиуме по сцинтилляционным и полупроводниковым детекторам (Вашингтон, 1972 г.)<sup>/5/</sup>, на международной конференции по ядерной физике (Мюнхен, 1973 г.)<sup>/6/</sup> и опубликованные в работах<sup>/7-27/</sup>.

#### Литература

1. Акимов Ю.К., Борейко В.Ф., Дорчоман Д., Калинин А.И. и др. Материалы симпозиума по наносекундной ядерной электронике. ОИЯИ, 13-3700, Дубна, 1967.
2. Арльт Р., Калинин А.И., Музиоль Г., Штруссный Х. Доклад на XVIII ежегодном совещании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Рига, январь 1968 г. (Препринт ОИЯИ 13-3769, Дубна, 1968).
3. Борейко В.Ф., Залманзон Ю.Б., Калинин А.И. Симпозиум по клинической дозиметрии. Ленинград, Наука (Ленинградское отд.), 1969.
4. Акимов Ю.К., Андерт К., Казаринов Ю.М., Калинин А.И. и др. Международная конференция по физике элементарных частиц. Киев, 1970 г. (ЖЭТФ, 62, 1231, 1972 г.).
5. Андерт К., Акимов Ю.К., Калинин А.И., Ортелеп Г. Международный симпозиум по сцинтилляционным и полупроводниковым детекторам. Вашингтон, 1972 г., IEEE Trans. on Nucl.Sci. NS-19, N 3, 404 (1972).
6. Andert et al. Proceedings of the International Conference on Nuclear Physics. Munich, 1973, vol. I. North-Holland/American Elsevier.

7. Акимов Ю.К., Калинин А.И. Материалы совещания по полупроводниковым детекторам ядерных излучений. Дубна, 1962 г., стр. 84.
8. Акимов Ю.К., Бабенко Л.П., Ван Чжень-ва, Головин Б.М., Калинин А.И. и др. Там же, что п. 7, стр. 69, Дубна, 1962 г.
9. Калинин А.И. Международное рабочее совещание "Изготовление и применение полупроводниковых детекторов". Россендорф (ГДР), 1963 г, ZfK-Pn12.
10. Акимов Ю.К., Калинин А.И., Никитин В.А., Пантуев В.С. и др. ЭТФ, 48, 767, 1965 г.
11. Акимов Ю.К., Золин Л.С., Калинин А.И., Никитин В.А. и др. Ядерная физика, т. IV, вып. I (88), 1966 г.
12. Арльт Р.Д., Банифатов А.Е., Калинин А.И., Петров М.М., Тывин Л.И. ПТЭ № 6, 48 (1971 г.)
13. Акимов Ю.К., Андерт К., Калинин А.И., Чурин И.Н., Шуравин В.Н. ПТЭ № 6, 51 (1971 г.)
14. Акимов Ю.К., Калинин А.И., Розанов Е.И., Сидоров А.И. Препринт ОИЯИ, Р-1695, Дубна, 1964 г.
15. Калинин А.И., Шейко В.Д. Препринт ОИЯИ, 2357, Дубна, 1965 г.
16. Калинин А.И., Препринт ОИЯИ, I3-3015, Дубна, 1966 г.
17. Громов К.Я., Калинин А.И., Кузнецов В.В., Ненов Н.П. и др. Препринт ОИЯИ, 2724, Дубна, 1966 г.
18. Акимов Ю.К., Калинин А.И., Кушнирук В.Л., Юнглауссен Х., Полупроводниковые детекторы ядерных излучений и их применение. Атомиздат, 1967 г.
19. Арльт Р., Кадькова С., Калинин А., Моисеева В. и др. Препринт ОИЯИ, Р6-3773, Дубна, 1968 г.
20. Акимов Ю.К., Банифатов А.Е., Головин Н.А., Калинин А.И. и др. Препринт ОИЯИ, I3-3855, Дубна, 1962 г.

21. Борейко В.Ф., Бугарчев Б.Б., Вайнберг М.Ш., Валуев Ю.М., Желепов В.П., Калинин А.И. и др. Доклад на Всесоюзной научно-технической конференции "XX лет производства и применения изотопов и источников ядерных излучений в народном хозяйстве СССР". Минск; 1968 г. (Препринт ОИЯИ I6-4507, Дубна, 1969 г.)
22. Дубровина Л.И., Зотов В.В., Калинин А.И., Спасов А.Я. Препринт ОИЯИ В-4537, Дубна, 1969 г.
23. Арльт Р., Калинин А.И. Депонированная публикация ОИЯИ, Б4-I3-4875, Дубна, 1970 г.
24. Акимов Ю.К., Андерт К., Банифатов А.Е., Дойчев П., Калинин А.И. и др. Сообщение ОИЯИ I3-6236, Дубна, 1972 г.
25. Андерт К., Банифатов А.К., Габриэль Ф., Калинин А.И. Сообщение ОИЯИ, P13-6944, Дубна, 1973 г.
26. Андерт К., Габриэль Ф., Калинин А.И. Препринт ОИЯИ I3-7125, Дубна, 1973 г.
27. Амов Б., Вылов Ц., Желев Ж., Калинин А.И. и др. ОИЯИ Д6-5783, Дубна, 1971 г.
28. Нагорный П.Я., Анализ и расчет усилительных схем. Гос. изд. техн. лит. Киев, 1963 г.
29. Radeka V. Intern. Symp. on Nucl. Electronics. V.1, Versailles, 61 (1968).
30. Hill N.M., Allbritton W.P., Nucl. Instr. and Meth. 75, N 1, 18 (1969).
31. Millard J.K., Blalock T.V., Hill N.M., IEEE Trans., NS-19, N 1, 388 (1972).
32. Elad E., IEEE Trans., NS-19, N 1, 403 (1972).

Рукопись поступила в издательский отдел  
29 апреля 1974 года.