

С 344.3

ФР-459

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

2305

Б.Ф. Фефилов

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ СОГЛАСОВАНИЯ
СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ
С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ДЕТЕКТОРАМИ
ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук

А.Ф. Линев

Дубна 1965

2305

Б.Ф. Фейлов

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ СОГЛАСОВАНИЯ
СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ
С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ДЕТЕКТОРАМИ
ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук

А.Ф. Лиев

Дубна 1985

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Полупроводниковые детекторы ядерных излучений за последние годы находят широкое применение в экспериментальной ядерной физике, дозиметрии, медицине, геологии и в ряде других отраслей науки. Этому способствовали, во-первых, определенные преимущества, которые выгодно отличают эти детекторы от всех ранее известных аналогичных устройств, и, во-вторых, успехи в технологии изготовления чистых исходных материалов (кремния и германия).

Отличное энергетическое разрешение, высокое быстродействие, малые габариты, простота питания и способность работать в достаточно сильных магнитных полях - ценные качества полупроводниковых детекторов, которые обусловили возможность проведения многих физических экспериментов на ускорителях тяжелых ионов Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. В первую очередь это относится к экспериментам, связанным с синтезом и идентификацией далеких трансурановых элементов. Основная трудность, которая встречается при решении таких задач с помощью тяжелых ионов, связана с малой величиной сечений ядерных реакций (порядка $10^{-32} - 10^{-34}$ см²). Обычно такие эксперименты проводятся на внутренней лучке ускорителя в условиях сильных высокочастотных и магнитных полей. Оказалось, что возможность регистрации и спектрометрии продуктов реакции с достаточно низким фоном в столь тяжелых условиях могут успешно обеспечить полупроводниковые детекторы.

В связи с этим возникла необходимость разработки спектрометрических усилителей для работы с такими детекторами. К сожалению, полупроводниковые детекторы имеют ряд недостатков, которые затрудняют реализацию их высокого энергетического разрешения. К таким недостаткам относятся сравнительно малая величина сигнала, широкий диапазон собственной емкости (от десятков до сотен и тысяч пикофард) и наличие собственного источника шума за счет токов утечки. Кроме того, поверхностно-барьерные детекторы имеют зависимость собственной емкости от потенциала смещения и удельного сопротивления материала.

При таком разбросе параметров практически невозможно сконструировать универсальный усилительный тракт, который работал бы в оптимальном режиме для всех детекторов, т.е. в режиме, обеспечивающем получение наилучшего энергетического разрешения.

лампы. Обычно значение коэффициента В принимают лежащим в интервале 2,5-3. Однако проведенные измерения дают значение для В = 3-6. Вероятно это связано с тем, что современные широкополосные лампы с большой крутизной имеют расстояния между проволочками сетки гораздо большие по сравнению с катодно-сеточным промежутком. Как правило, коэффициент В растет с ростом анодного тока.

Количественно величина шума как системы детектор-усилитель в целом, так и отдельных компонент шума усилителя выражалась в единицах энергии, - ширина линии шума (полная ширина на половине максимума кривой спектрального распределения). Ширина линии шума (Δ) связана с величиной шума в средне-квадратичных электронах ($\bar{N}_{ш}$) следующей зависимостью:

$$\Delta = 2,36\epsilon \sqrt{\bar{N}_{ш}^2} \quad (1)$$

где ϵ - средняя энергия образования электроно-дырочной пары. Для кремниевых детекторов $\Delta^{Si} = 8,5 \sqrt{\bar{N}_{ш}^2}$ и для германиевых детекторов $\Delta^{Ge} = 7 \sqrt{\bar{N}_{ш}^2}$.

Если полоса пропускания усилителя ограничена дифференцирующими и интегрирующими RC-цепями с равными постоянными времени τ (оптимальный случай отношения сигнал-шум), а сигнал от детектора можно принять в форме скачка потенциала, то приведенная к входу нормализованная по сигналу величина шума (в кэв для кремниевых детекторов) будет равна:

$$\Delta_{11} = (41 \cdot 10^{-6} \frac{R_{ша} C^2}{\tau} + 0,82 I_g \tau + \frac{41\tau}{R} + 10^{-3} C^2)^{1/2} \quad (2)$$

$$\Delta_{21} = (19,4 \cdot 10^{-6} \frac{R_{ша} C^2}{\tau} + 1,15 I_g \tau + \frac{58\tau}{R} + 0,96 \cdot 10^{-3} C^2)^{1/2} \quad (3)$$

$$\Delta_{12} = (80 \cdot 10^{-6} \frac{R_{ша} C^2}{\tau} + 0,53 I_g \tau + \frac{27\tau}{R} + 1,3 \cdot 10^{-3} C^2)^{1/2} \quad (4)$$

$$\Delta_{22} = (41 \cdot 10^{-6} \frac{R_{ша} C^2}{\tau} + 0,82 I_g \tau + \frac{41\tau}{R} + 1,4 \cdot 10^{-3} C^2)^{1/2} \quad (5)$$

Здесь первый индекс при Δ обозначает число интегрирующих цепей, а второй - число дифференцирующих, С - входная емкость усилителя вместе с емкостью детектора (пф),

$R_{ша}$ - эквивалентное сопротивление дробового шума (ом), I_g - сумма компонент сеточного тока и тока утечки детектора (на), R - входное сопротивление усилителя (мгом), τ в мсек. При оптимальных постоянных времени

$$\tau_{опт11} = \tau_{опт22} = 7 \cdot 10^{-3} C R_{ша}^{1/2} I_g^{-1/2} \quad (6)$$

$$\tau_{опт21} = 4 \cdot 10^{-3} C R_{ша}^{1/2} I_g^{-1/2} \quad (7)$$

$$\tau_{опт12} = 12 \cdot 10^{-3} C R_{ша}^{1/2} I_g^{-1/2} \quad (8)$$

минимальная ширина линии шума для кремния для различных типов формирования

$$\Delta_{мин}^{Si} = (0,1 - 0,12) C^{1/2} R_{ша}^{1/4} I_g^{1/4} \quad (9)$$

На основании выражений (2) - (8) построены номограммы для определения ширины линии шума от основных источников шума и для оптимальной постоянной времени формирования по измеренным значениям $R_{ша}$ и I_g .

Для поверхностно-барьерных детекторов со средним разрешением и собственной емкостью более 50 пф определяющим параметром при выборе типа и режима входной лампы является эквивалентное сопротивление дробового шума, а для низкочастотных р-и-п детекторов определяющим параметром является входная емкость лампы и произведение $R_{ша} I_g$.

По результатам измерений установлено, что для α -спектрометрии на поверхностно-барьерных детекторах в качестве входных ламп могут быть успешно использованы 6СЗП, 6С15П и 6Ж9П в триодном включении, а для β , γ спектрометрии на р-и-п детекторах и поверхностно-барьерных кремниевых детекторах с охранными кольцами из высокоомного материала целесообразно использовать в качестве входной лампы 6Н23П с предварительным отбором по шумовым характеристикам. Показана целесообразность предварительной тренировки ламп и ориентировочного их отбора по анодному току.

В заключение приводятся схемы сконструированных зарядовых предусилителей для различных типов детекторов. Ширина линии шума предусилителя для β , γ спектрометрии с входной лампой 6Н23П не превышала 2 кэв для кремния (1,8 кэв для германия) при внешней входной емкости 10 пф^{1/2}, ширина линии шума предусилителей для α -спектрометрии колебалась от 6 кэв до 12 кэв для кремния в зависимости от типа и режима входной лампы при внешней входной емкости 100 пф^{1/3,4}. Полученные результаты являются одними из лучших в числе тех, которые были опубликованы до настоящего времени другими авторами.

Третья глава диссертации посвящена применению транзисторов в спектрометрических усилителях для полупроводниковых детекторов.

На основании анализа эквивалентной схемы системы полупроводниковый детектор-

транзистор выведены основные критерии выбора входного транзистора и его режима. Минимальная ширина линии шума транзисторных усилителей

$$\Delta_{\text{мин}}^{\text{ш}} = 4,7 C \cdot a^{-1/4} \beta^{-1/4} \quad (10)$$

обеспечивается в диапазоне отношения эмиттерного тока к суммарному току базы и утечки детектора $10^2 - 10^3$ в зависимости от значения коэффициента усиления по току транзистора (β). В соответствии с этим рабочие значения тока эмиттера входного транзистора лежат в пределах от 10 до 300 мка. Входной транзистор должен иметь высокое значение коэффициента усиления по току при таких низких значениях эмиттерного тока, минимальное значение произведения $I_{\text{к0}} \tau_{\delta}$, высокую граничную частоту и минимальную входную емкость. Наиболее подходят для работы в спектрометрических усилителях дрейфовые высокочастотные германиевые транзисторы П403 (П402), П411^{/5/}.

Несмотря на сравнительно большой уровень собственных шумов, транзисторные усилители могут успешно применяться во многих физических экспериментах, связанных со спектрометрией тяжелых заряженных частиц на детекторах со средним разрешением. Высокая экономичность, малые габариты, большой срок службы и эксплуатационная надежность, нечувствительность к относительно сильным магнитным полям делают их незаменимыми, например, при изучении спонтанного деления трансураниевых элементов^{/6/} или при измерении энергии ускоренных ионов циклотрона^{/7/}. Особенно ощутимы преимущества транзисторных схем при сравнительно больших собственных значениях емкости детекторов, где они успешно конкурируют с ламповыми схемами с точки зрения вклада собственных шумов в результирующее энергетическое разрешение.

Наименьшая ширина линии шума, которая была получена с транзисторными предусилителями, составляла 38 кэв в эквиваленте для кремния при внешней входной емкости 35 пф^{/5/}.

Новые возможности открылись с появлением полевых транзисторов, имеющих большое входное сопротивление, малую входную емкость, высокую граничную частоту и уровень шума, сравнимый с лампами. Экспериментальные данные^{/8/} свидетельствуют о том, что оптимальная схема предусилителя для спектрометрии на р-и-п детекторах может быть построена на полевых транзисторах, если расположить входной каскад в охлаждаемой камере в непосредственной близости от самого детектора. Наименьшая ширина линии шума в этом случае составляет 0,8-1,4 кэв в эквиваленте для германия при температуре около 125°К. Для работы с поверхностно-барьерными детекторами целесообразно использовать комбинированные усилители с входом, выполненным на металло-керамической лампе 6С51Н или 6Н27П, а дальнейшее усиление осуществлять на обычных транзисторах^{/2/}.

В четвертой главе диссертации формулируются основные требования к линейным

импульсным усилителям, предназначенным для работы с зарядовыми предусилителями, и предлагаются схемы таких усилителей, выполненные как на лампах, так и на транзисторах^{/2,9/}. В состав усилителей входят схемы экспандеров (пороговых усилителей) для детального изучения участка спектра на амплитудных анализаторах с ограниченным числом каналов.

Разработанные усилители имеют максимальный коэффициент усиления от 5000 до 20000, линейность амплитудной характеристики не хуже 0,1-0,5%, нестабильность коэффициента усиления не более 0,2-0,3%, собственное время нарастания 0,1-0,2 мксек с широкими возможностями выбора типа и величины постоянных времени формирующих цепей. Уровень шума, приведенный к входу, лежит в пределах от 5 до 15 мкв средне-квартичных при постоянной времени формирования 1 мксек.

Основные итоги проделанной работы сводятся к следующему:

1. Систематизирован материал по основным факторам, ограничивающим энергетическое разрешение полупроводниковых детекторов.
2. Проведен анализ эквивалентной схемы системы детектор-усилитель с экспоненциальным импульсом тока на входе и получены расчетные соотношения для времени нарастания сигнала с различными видами усилителей.
3. Рассмотрены различные схемы построения зарядовых предусилителей с большим коэффициентом усиления в разомкнутой петле обратной связи.
4. Составлены номограммы для определения основных источников шума системы полупроводниковый детектор-усилитель, оптимальной постоянной времени формирования и минимальной ширины линии шума в зависимости от параметров детектора, входной лампы и типа формирования.
5. Разработана методика согласования предусилителей с полупроводниковыми детекторами.
6. Предложен метод и проведены измерения эквивалентного сопротивления дробового шума и значения сеточного тока ряда широкополосных усилительных ламп в зависимости от их режима.
7. Показана целесообразность предварительной тренировки ламп и сброса их по максимальному анодному току в режиме со свободной сеткой.
8. На основе предложенной методики разработан предусилитель для спектрометрии на р-и-п детекторах с шириной линии шума 1,8 кэв в эквиваленте для германия при внешней входной емкости 10 пф и постоянной времени формирования 1 мксек.
9. Разработаны предусилители для спектрометрии на поверхностно-барьерных детекторах с шириной линии шума от 6 до 12 кэв в эквиваленте для кремния при внешней входной емкости 100 пф.

10. Определены критерии выбора входного транзистора и его режима для применения в спектрометрических предусилителях.

11. Разработаны схемы зарядовых предусилителей на транзисторах и применены в физических экспериментах на ускорителях тяжелых ионов для определения периода полураспада спонтанного деления трансурановых элементов, для регистрации продуктов деления тяжелых ядер в реакциях с сечением до 10^{-34} см² и для измерения энергии ускоренных ионов внутри пиклотрона с точностью не хуже $\pm 2\%$.

12. Показана целесообразность применения полевых транзисторов для β , γ -спектрометрии на $p-i-n$ детекторах, если входной транзистор расположен непосредственно в охлаждаемой камере вместе с детектором.

13. Предложены схемы предусилителей для работы в магнитных полях и малогабаритного комбинированного лампово-транзисторного предусилителя.

14. Разработаны схемы основных линейных импульсных усилителей и экспандеров (пороговых усилителей), имеющие линейность амплитудной характеристики не хуже 0,1-0,5%, максимальный дрейф коэффициента усиления не более 0,2-0,3% за 3 часов, собственное время нарастания 0,1-0,2 мксек и широкий диапазон регулировки усиления. Все усилители имеют не менее трех формирующих цепей с регулируемым постоянным временем от 0,1 до 10-30 мксек.

Основной материал, использованный в диссертации, опубликован в статьях /2,3,6,7,8,10,11/ и доложен на пятой и шестой Всесоюзных конференциях по ядерной электронике /4,5,9/.

В заключение считаю своим приятным долгом поблагодарить руководителя работы кандидата технических наук А.Ф. Ляева, члена-корреспондента АН СССР Г.Н. Флерова, а также В.Г. Субботина, Л. Кумпф, М.С. Бирулева и кандидата физико-математических наук Е.А. Друина за помощь в работе и обсуждение результатов.

Л и т е р а т у р а

1. А.Б. Джинишпи. Сигнал, шум и разрешающая способность усилителей. Атомиздат, 1964 г.
2. Б.В. Фефилов, Л. Кумпф. Преприят ОИЯИ, 2110, Дубна, 1965 г.
3. Б.В. Фефилов. ПТЭ, № 5, 121, 1964 г.
4. Б.В. Фефилов. Труды пятой научно-технической конференции по ядерной радиоэлектронике, т. 1. Госатомиздат, 1962 г.
5. В.Г. Субботин, Б.В. Фефилов. Труды шестой конференции по ядерной радиоэлектронике, Атомиздат, 1964 г.
6. Б.А. Друин, Н.К. Скобелев, Б.В. Фефилов, Г.Н. Флеров. Преприят ОИЯИ Р-1580, Дубна 1964 г.
7. Х. Кекк, В.Л. Михеев, А.А. Плева, Б.В. Фефилов. ПТЭ, № 4, 27, 1963 г.

8. Б.В. Фефилов. Преприят ОИЯИ 1897, Дубна 1964 г.

9. Б.В. Фефилов. Труды шестой конференции по ядерной радиоэлектронике. Атомиздат, 1964 г.

10. Б.В. Фефилов. Преприят ОИЯИ 1074, Дубна 1962 г.

11. В.Г. Субботин, Б.В. Фефилов. Материалы совещания по полупроводниковым детекторам ядерных излучений, Дубна, 1962 г.

Рукопись поступила в издательский отдел
29 июля 1985 г.