

93-331



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

P13-93-331

В.А.Коробейников

**ИЗМЕРЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ
ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ
ДЛЯ КРИОГЕННЫХ ДЕТЕКТОРОВ**

1993

Введение. В последнее время для решения ряда фундаментальных задач, таких как поиск "темной" материи, двойного безнейтринного β -распада, магнитного монополя и массы нейтрино [1-3], энергично развивается новый класс детекторов низкоионизирующих излучений - так называемые криогенные детекторы. Они основаны на поглощении излучения твердым поглотителем, охлажденным до температур милликельвинного диапазона. При этом фоновая теплоемкость столь мала, что энергия поглощенной элементарной частицы вызывает всплеск температуры или неравновесное возмущение фонового газа, доступное измерению с помощью криогенных термометрических систем. Такие детекторы обладают низким порогом и хорошим энергетическим разрешением.

Основные элементы криогенного детектора калориметрического типа показаны на рис.1.

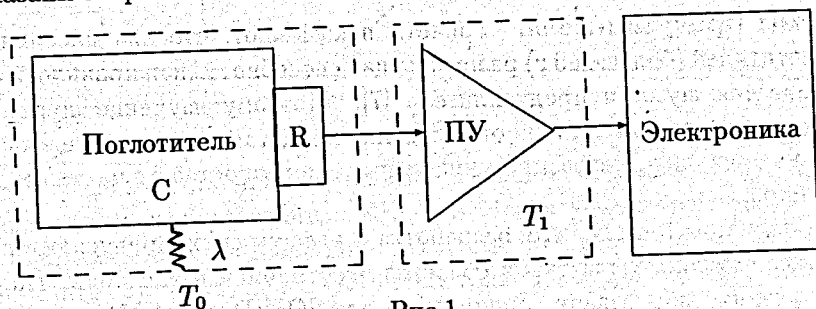


Рис.1

В простом случае криогенный детектор калориметрического типа включает в себя поглотитель и преобразователь R теплового сигнала в электрический импульс. В качестве такого преобразователя можно использовать, например, полупроводниковый терморезистор. Слабая тепловая связь λ соединяет поглотитель теплоемкостью C с термостатом, имеющим температуру T_0 . Сигнал с термометра подается на предусилитель ПУ, который находится при температуре T_1 , а затем на блок обработки. Разрешающая способность детектора и его энергетический порог определяются шумами, возникающими в поглотителе и тракте измерения температуры.

Источники шумов криогенного детектора калориметрического типа. Можно выделить следующие основные источники шумов:

1. Термодинамические флуктуации в поглотителе, возникающие вследствие ограниченных размеров поглотителя, соединенного с термостатом, который предполагается бесконечно большим. Флуктуации энергии даются следующей формулой:

$$(\Delta E)_{thermal} = \sqrt{(k_B T)(CT)} \quad (1)$$

2. Тепловые шумы сопротивления термометра

$$(\Delta U_T)^2 = 4k_B T R B \quad (2)$$

со спектром белого шума в полосе частот B .

3. Дробовой шум сопротивления термометра, зависящий от тока через него и имеющий спектр белого шума.

4. Шумы предусилителя.

Шумы предусилителя. Расчеты показывают, что для массивных поглотителей (больше 10 г) разрешающая способность, как правило, ограничивается шумами предусилителя [7]. Поэтому изучение шумовых свойств предусилителя и их оптимизация представляют непосредственный интерес для реализации уникальных возможностей криогенных детекторов.

Следует отметить, что разработка маломощных предусилителей необходима также для таких областей электроники и экспериментальной физики, как создание аппаратуры для SQUID, для ЯМР, построение детекторов гравитационного излучения и т.д.

Частотный диапазон предусилителя обусловлен спектром сигнала от термометра криогенного детектора. Типичный выходной сигнал полупроводникового Ge-терморезистора для детектора с массой 2,8 г характеризуется передним фронтом 1,8 мс и длительностью 13 мс [9], что соответствует полосе частот 80 - 1000 Гц.

В данной работе изучались спектры шумов в низкочастотном диапазоне от 3 Гц до 5000 Гц при температурах 300 и 77 К для серийных кремниевых полевых транзисторов КП303(г,д,е), КП307ж, КП337г, а

также при температурах 300, 77 и 4,2 К для GaAs полевых транзисторов с р-п-переходом и барьером Шоттки ЗП320а и ЗП324а соответственно. Шумы кремниевых транзисторов при температуре жидкого гелия не измерялись, поскольку эти транзисторы неработоспособны при столь низкой температуре вследствие "вымерзания" примесной проводимости.

Методика измерений. Блок-схема экспериментальной установки показана на рис.2.

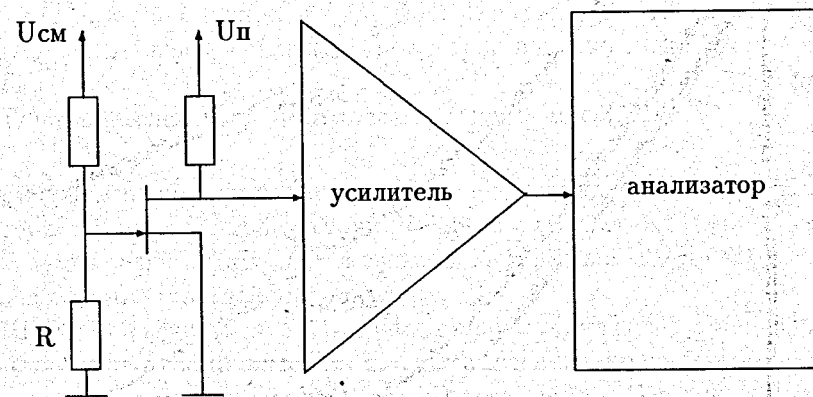


Рис.2

Установка состояла из охлаждаемой вставки, согласующего усилителя и анализатора спектра СК4-72. Исследуемый транзистор и резисторы смещения затвора помещались во вставку, которую можно было опускать в сосуд с жидким азотом или гелием для проведения измерений при температурах 77 и 4,2 К соответственно.

Согласующий усилитель состоял из двух каскадов. С целью уменьшения уровня шумов усилителя в первом каскаде с коэффициентом усиления 12 был использован заранее отобранный транзистор КП337г. Второй каскад был собран на операционном усилителе КР140УД6 по схеме неинвертирующего усилителя с коэффициентом усиления 100. Для подавления высокочастотных шумов на шине питания поставлен конденсатор ёмкостью 15 мкФ. Шумы усилителя, приведенные к его входу, составили величину $8 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$. В случаях, когда эти шумы были

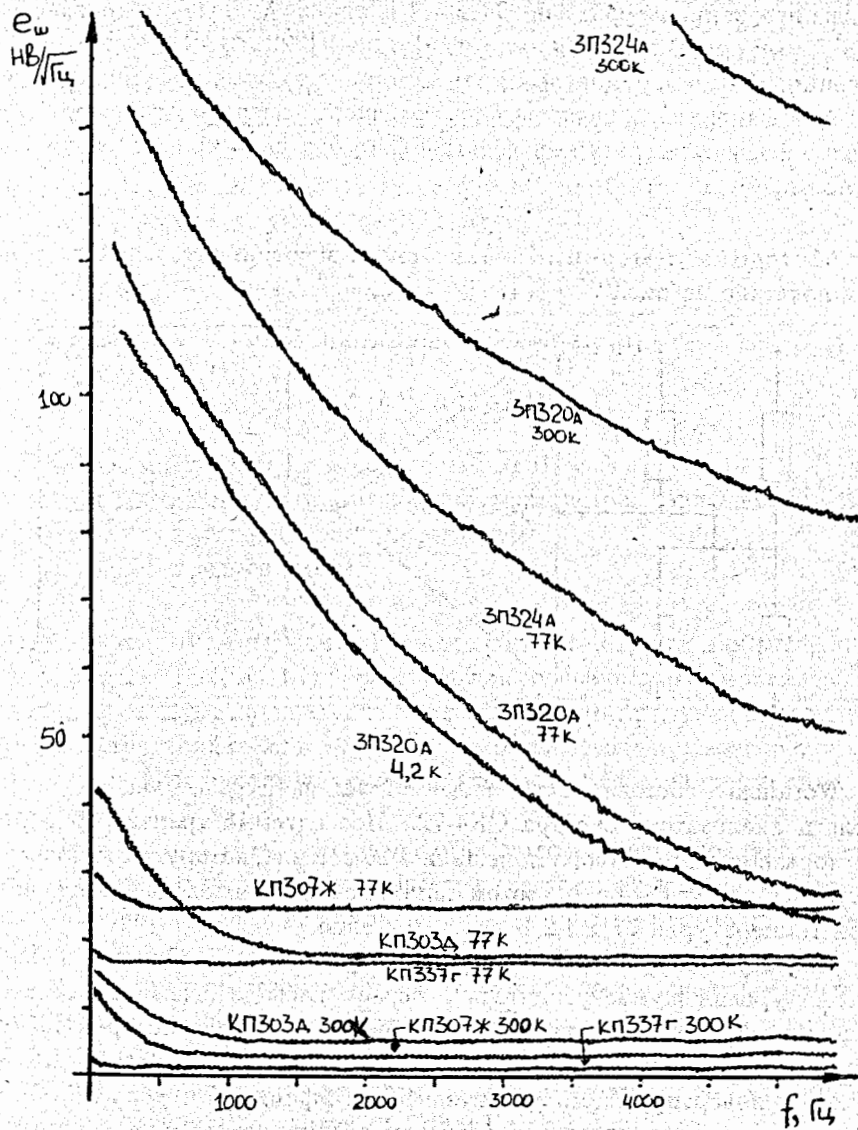


Рис. 3

сравнимы с шумами исследуемого транзистора, спектр шумов согласующего усилителя учитывался при окончательной обработке результатов измерения.

Предварительно снимались вольт-амперные характеристики транзисторов. Это было необходимо для выбора рабочей точки, так как усиление и шумы транзистора зависят от режима работы. Затем с помощью анализатора спектра измерялись интегральные спектры шумов на выходе согласующего усилителя в диапазонах 200 Гц, 2000 Гц и 5000 Гц. Спектры усреднялись по 64 (1024 для 5000 Гц) выборкам. После нормировки на коэффициент усиления и ширину полосы канала анализатора получались спектры шумов, отнесенные ко входу транзистора $e_w(f)$.

Типичные спектры шумов представлены на рис.3.

Обсуждение результатов. Из графиков видно, что лучшие характеристики имеют транзисторы КП337Г, имеющие остаточный уровень шумов менее $1.3 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ в области частот выше 60 Гц (для всех 5 исследованных экземпляров).

Шумовые свойства полевых транзисторов при низких температурах представляют особый интерес, т.к. охлажденные транзисторы с р-п-переходом имеют лучшие шумовые свойства [6-8]. Известно [8], что оптимальная температура, при которой транзистор имеет минимальный уровень шумов, выше 77 К, поэтому требуются дополнительные измерения для её нахождения. Полученные данные для 77 К показали, что при этой температуре шумы больше, чем при комнатной.

Для GaAs-транзисторов ситуация иная. Для них на низких частотах, как и указано в [4-5], преобладают шумы типа $1/f$. При 77 К их шумы в 2 - 3 раза меньше, чем при комнатной температуре. Дальнейшее охлаждение до 4,2 К показывает, что низкочастотные шумы, обусловленные шумом $1/f$, существенно не меняются, хотя и по-прежнему очень сильно зависят от режима работы транзистора.

Таким образом, методика измерений даёт качественное и количественное представление о шумовых свойствах транзисторов и предоставляет достаточно простую возможность отбора транзисторов по шумовым параметрам.

Заключение. Исходя из полученных результатов, можно утверждать следующее :

1. Использование GaAs - транзисторов обоих типов в низкочастотном диапазоне даже при охлаждении до 4,2 К неэффективно вследствие больших шумов типа $1/f$.

2. При использовании предусилителя на КП337г можно получить уровень шумов менее $1,3\text{нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$.

3. Необходимо провести дополнительные исследования шумовых свойств транзисторов КП337г в диапазоне температур 300-77 К для нахождения оптимальной температуры. При этом при построении усилителя с охлаждаемым первым каскадом на транзисторах этого типа можно надеяться на достижение уровня шумов менее $1\text{нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$.

Работа поддержана РФФИ, грант № 93-02-3742, и Американским Физическим Обществом.

Автор выражает благодарность Инжечкину Л.В. и Трофимову В.Н. за содействие при выполнении работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. D.McCammon, U.Juda, J.Zhang, R.L.Kelley, S.H.Mosley and A.E.Szymkowiak. IEEE Trans. NS-33(1986) 236.
2. D.Hueber, C.Valette and G.Waysand. Cryogenics 21(1981) 387.
3. A.Drukier and L.Stodosl'sky. Phys.Rev.D30(1984) 2295.
4. K.Takagi, A.van der Ziel. Solid State Elect. 22(1979) 285.
5. A.van der Ziel. Adv.in Electronics and Electron Phys. 49(1979) 225.
6. A.Glassmacher, J.R.Cessna, W.Winkelnkemper. IEEE Trans. NS-27(1980) 308.
7. C.E.Cox, K.Kandiah. IEEE Trans. NS-31(1984) 465.
8. F.N.H.Robinson. Noise and fluctuations in electronic devices and circuits. Clarendon press, Oxford, 1974.
9. Makoto Minowa, Michiaki Sakamoto, Yutaka Ito, Takayuki Watanabe, Wataru Ootani, Youiti Ootuka. Nucl. Instr.and Meth. A327(1993) 612.

Рукопись поступила в издательский отдел
6 сентября 1993 года.

Принимается подписка на препринты, сообщения Объединенного института ядерных исследований и «Краткие сообщения ОИЯИ».

Установлена следующая стоимость подписки на 12 месяцев на издания ОИЯИ, включая пересылку, по отдельным тематическим категориям:

Индекс	Тематика	Цена подписки на год
1.	Экспериментальная физика высоких энергий	915 р.
2.	Теоретическая физика высоких энергий	2470 р.
3.	Экспериментальная нейтронная физика	365 р.
4.	Теоретическая физика низких энергий	735 р.
5.	Математика	460 р.
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия	275 р.
7.	Физика тяжелых ионов	185 р.
8.	Криогеника	185 р.
9.	Ускорители	460 р.
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных	560 р.
11.	Вычислительная математика и техника	560 р.
12.	Химия	90 р.
13.	Техника физического эксперимента	720 р.
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами	460 р.
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях	460 р.
16.	Дозиметрия и физика защиты	90 р.
17.	Теория конденсированного состояния	365 р.
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники	90 р.
19.	Биофизика	185 р.
	«Краткие сообщения ОИЯИ» (6 выпусков)	560 р.

Подписка может быть оформлена с любого месяца года.

По всем вопросам оформления подписки следует обращаться в издательский отдел ОИЯИ по адресу: 141980, г.Дубна, Московской области