

67

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

2388/83

10/5-83

13-83-70

П.К.Маньяков, В.Тлачала, Л.Тыкарски

УСИЛИТЕЛИ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ ДЛЯ РАБОТЫ
ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 4,2 К

Направлено в журнал "Nukleonika"

1983

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе представлены результаты исследований поведения полевых транзисторов при низких температурах* с учетом их последующего применения в схемах быстродействующих усилителей, работоспособных при температуре жидкого гелия. Необходимость разработки таких усилителей возникла в связи с требованием создания системы съема информации с пикап-электродов ускорителя на сверхпроводящих магнитах. Сигналы с пикап-электродов необходимо пересылать по линиям связи к электронной регистрирующей аппаратуре, расположенной вне камеры ускорителя, то есть на расстоянии не менее 10 метров. Так как емкость линии связи намного больше емкости пикап-электродов, между ними необходимо поставить буферный каскад, обеспечивающий развязку и, кроме того, усиление сигнала по мощности. В связи с этим возникла потребность в разработке усилителя, предназначенного для работы в непосредственной близости от пикап-электродов. Пикап-электроды являются емкостными ~ 10 пФ датчиками, на которых в процессе ускорения частиц индуцируются импульсы напряжения, меняющиеся в широких пределах как по величине, так и по длительности. От десятков милливольт до единиц вольт и от нескольких наносекунд до нескольких десятков наносекунд соответственно. Следовательно, усилитель для пикап-электродов должен удовлетворять ряду особых требований, важнейшими из которых являются: большое входное сопротивление /не менее 4 МОм/, малое выходное сопротивление, собственное время нарастания около нескольких наносекунд и работоспособность при температуре 4,2 К. Дополнительные требования, предъявляемые к усилителю, - это высокая надежность, небольшие затраты мощности, простота конструкции и отладки, доступность компонентов. Разработке усилителя, обладающего такими свойствами, посвящена данная работа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Статические характеристики полевых транзисторов. Учитывая требования, предъявляемые к усилителям для пикап-электродов, а также сведения, имеющиеся в литературе [1-3], было решено испытать полевые транзисторы типа КП301Б и КП350 при температу-

* Термин "низкие температуры" относится к температурам окружающей среды, а не к температуре кристалла транзистора.

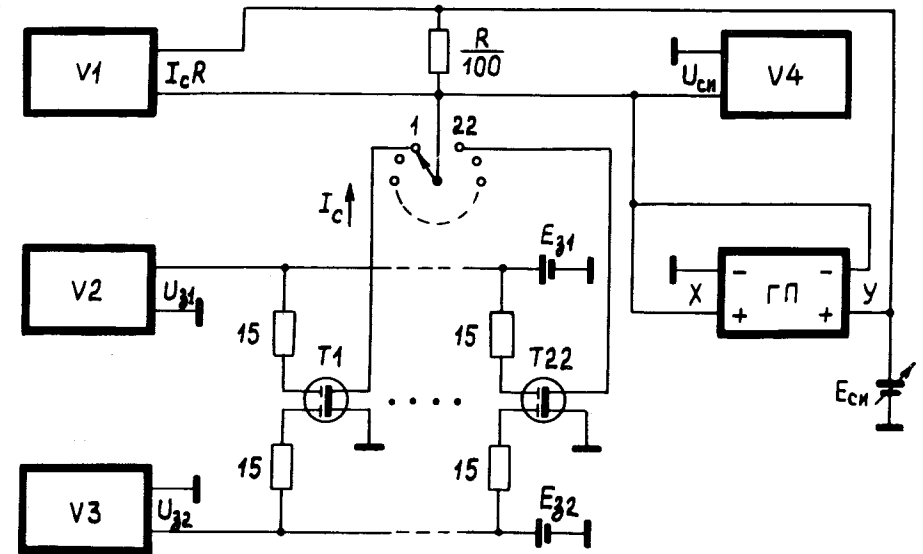


Рис.1. Блок-схема измерительной аппаратуры; V1÷V4 - цифровые вольтметры V530, ГП - графопостроитель НР 7004А.

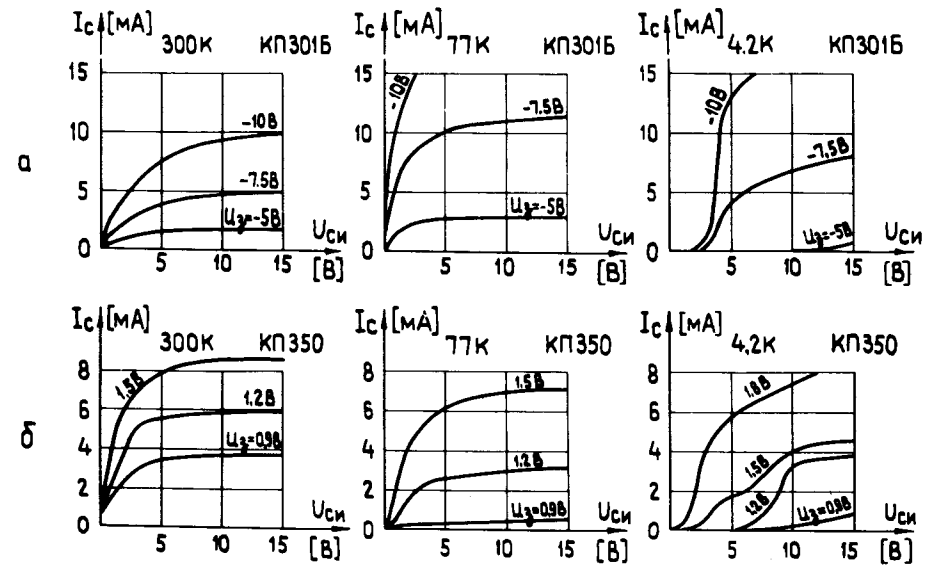


Рис.2. Выходные характеристики полевых транзисторов при 300, 77 и 4,2 К: а/ транзисторов КП301Б, б/ транзисторов КП350.

рах 300, 77 и 4,2 К. С помощью аппаратуры, блок-схема показана на рис.1, были сняты переходные и выходные характеристики 43 транзисторов КП301Б и 21 транзистора типа КП350.

На рис.2а показаны выходные характеристики транзисторов КП301Б, типичные для исследуемой партии, а на рис.2б - аналогичные характеристики транзисторов КП350. Как видно из рисунков, форма характеристик подвергается значительным изменениям, особенно при температуре жидкого гелия. При этом изменение формы характеристик для транзисторов КП301Б происходит иначе, чем для транзисторов КП350. Однако нет сомнений, что транзисторы обоих типов работают в жидком гелии, при этом выходные характеристики сдвигаются в сторону более высоких напряжений сток-исток. Для обоих типов транзисторов наблюдался эффект "вымораживания" при небольших напряжениях смещения затвор-исток, заключающийся в том, что первоначальное изменение величины напряжения затвор-исток сопровождается отсутствием тока стока, и только с некоторой величины этого напряжения происходит скачкообразное возрастание тока стока и выход на определенную точку вольт-амперной характеристики транзистора. Этот эффект иллюстрирует рис.3а. Последующие изменения напряжения затвор-исток в обоих направле-

ниях приводят лишь к перемещению точки по вольт-амперной характеристике. Аналогичные эффекты наблюдались при изменении напряжения сток-исток в процессе съема выходных характеристик транзисторов. Отмеченный эффект проявляется значительно сильнее у транзисторов КП350, чем у транзисторов КП301Б. Для обоих типов транзисторов существует также зона величин $[U_{си}, I_c]$, характеризующаяся тем, что для выведения транзистора в рабочую точку, принадлежащую этой зоне, необходимо предварительно вызвать протекание тока за счет достаточно высокого напряжения смещения, приложенного к затвору и стоку. На рис.3б приблизительно показаны границы этой зоны /зона №2/.

Основные различия между характеристиками транзисторов КП301Б и КП350 проявляются в величине наклона переходных характеристик и их форме. Типичные переходные характеристики транзисторов КП301Б имеют наклон около единиц мА/В, а для КП350 - на порядок больше. Переходные характеристики КП301Б имеют приблизительно линейный характер, в то же время на аналогичных характеристиках транзисторов КП350 можно выделить три участка: участок малых токов, переходной участок и участок больших токов. Первый участок, для которого характерно "вымораживание", отличается большим наклоном и почти линейным ходом характеристики. На втором - наклон характеристики мал, а третий ее участок имеет параболическую форму.

На рис.4а и б представлено распределение наклонов для первого и третьего участков переходных характеристик транзисторов КП350, а на рис.4в - распределение средних величин токов для второго участка. Распределения, касающиеся транзисторов КП350, относятся к группе из 21 транзистора. На рис.4г показано распределение наклонов характеристик транзисторов КП301Б, измеренных для 43 транзисторов, а на рис.4д - распределение напряжений отсечки* для них.

Усилители, предназначенные для работы при 4,2 К. На базе представленного выше семейства характеристик подобрана пара транзисторов КП301Б и реализована "гелиевая" часть усилителя, который испытан при комнатной температуре и в жидком гелии. На рис.5 представлена принципиальная схема усилителя, в которой можно выделить два узла. Один - на транзисторах T_1, T_2 и T_3 - работает в среде жидкого гелия в непосредственной близости от пикап-электродов, а второй, собранный на операционном усилителе ОУ, - при комнатной температуре, он предназначен для автоматического установления и контроля рабочей точки транзисторов T_1 и T_2 . Чтобы во время испытаний приблизиться максимально к реальным условиям работы усилителя, на его входы А и В подавались импульсы напряжения через конденсаторы емкостью 10 пФ. Выходы

* Под термином "напряжение отсечки" подразумевается напряжение затвор-исток для тока стока $I_D = 0,13$ мА.

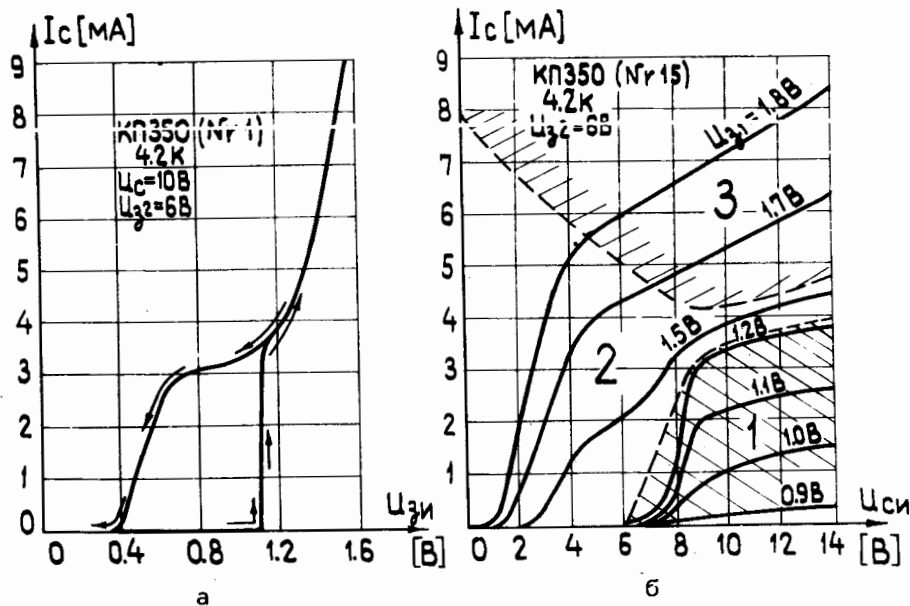


Рис.3. Пояснение эффекта "вымораживания" транзисторов: а/ гистерезис на вольт-амперной характеристике транзистора КП350; б/ зона первоначального отказа в работе транзисторов КП350 /зона №2/.

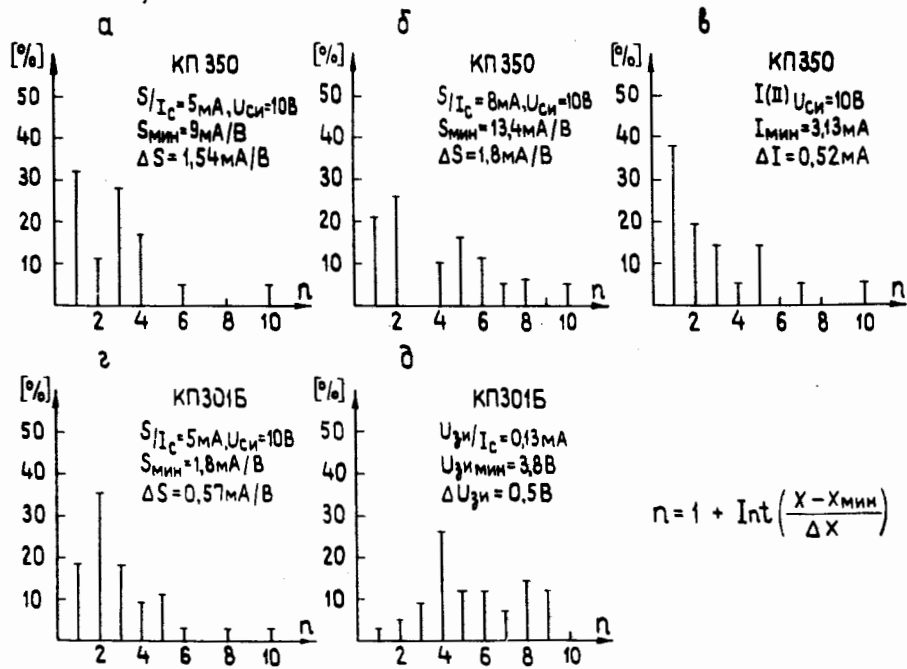


Рис.4. Результаты испытаний статистического разброса параметров для 21 транзистора КП301Б и 43 транзисторов КП350: а, б/ распределение по величине наклонов переходных характеристик для КП350; в/ распределение средних величин токов для КП350; г/ распределение по величине наклонов переходных характеристик для КП301Б; д/ распределение по величине напряжения отсечки для КП301Б.

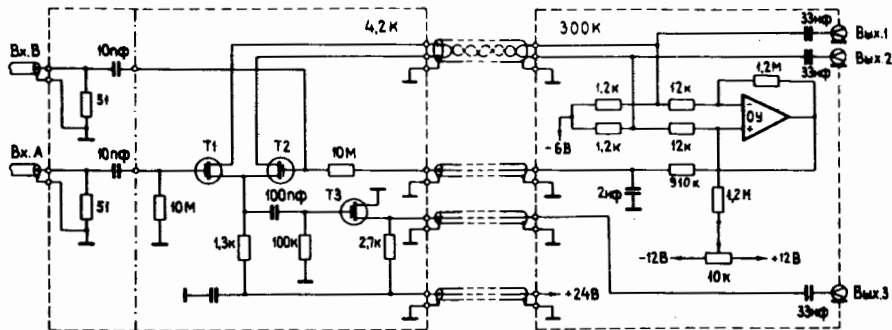


Рис.5. Принципиальная схема первого варианта усилителя, предназначенного для работы при 4,2 К; Т1 ÷ Т3 - полевые транзисторы КП301Б, ОУ - операционный усилитель 140УД7.

Таблица 1

Т	Входы			Выходы			
	U _A [МВ]	U _B [МВ]	τ [нс]	Вых.1		Вых.3	
[К]				U [МВ]	τ [нс]	U [МВ]	τ [нс]
4,2	+800	0	0,84	-35	4,8	—	—
	-800	0	0,84	+45	3,8	—	—
	0	+800	0,84	+40	16,7	—	—
	0	-800	0,84	-28	8,9	—	—
	+600	+600	0,84	-10	4,8	+75	2,0
	-600	-600	0,84	+17	5,4	-75	2,8

транзисторов Т1 и Т2 предназначены для съема сигналов, по которым можно определить сдвиг пучка относительно центра пикап-электродов, а транзистор Т3 предназначен для съема амплитуды большего из входных сигналов. Результаты измерений параметров усилителя представлены в табл. 1. Проведенные измерения показали полную пригодность усилителя для съема информации с пикап-электродов при температуре 4,2 К.

Достоинства усилителя: высокое быстродействие, большое входное сопротивление / ~ 4 МОм/, усиление по мощности ~ 2 · 10².

Недостатки: отсутствие возможности регулировать коэффициент усиления, заметное уменьшение амплитуды сигнала. Указанные недостатки можно устранить, если применить полевые транзисторы с двумя затворами и с большим наклоном переходной характеристики. Изменяя напряжения на втором затворе, можно влиять на величину наклона переходной характеристики. Так как этим требованиям удовлетворяют транзисторы КП350, на них реализован и испытан более сложный вариант усилителя, в котором помимо узла автоматической регулировки рабочей точки применена схема автоматической регулировки коэффициента

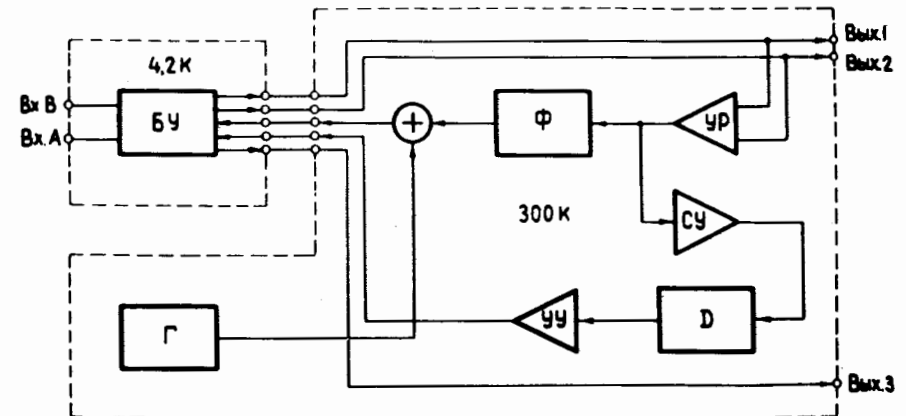


Рис.6. Структурная схема второго варианта усилителя, предназначенного для работы при 4,2 К: БУ - быстрый усилитель, Ф - фильтр; УР - усилитель, следящий за рабочей точкой; СУ - селективный усилитель; Д - детектор; УУ - управляющий усилитель; Г - генератор.

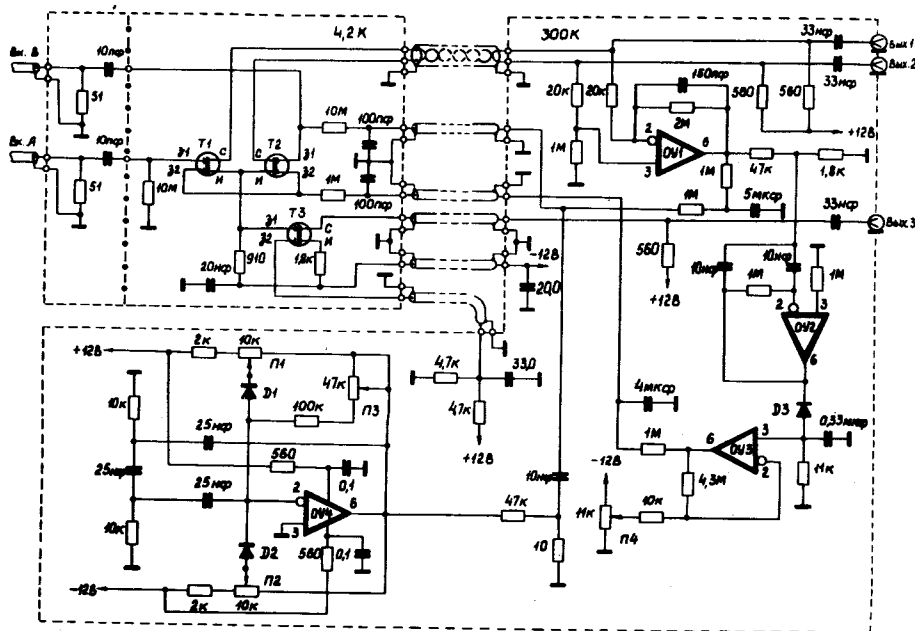


Рис.7. Принципиальная схема второго варианта усилителя, предназначенного для работы при 4,2 К; Т1 ÷ Т3 – полевые транзисторы КП350; Д1 ÷ Д3 – диоды КД513; ОУ1 ÷ ОУ4 – операционные усилители 14ОУЛ7.

Таблица 2

Т [К]	Входы			Выходы					
	U _A [мВ]	U _B [мВ]	τ [нс]	U _{Вых.1} [мВ]	τ [нс]	U _{Вых.2} [мВ]	τ [нс]	U _{Вых.3} [мВ]	τ [нс]
4,2	+600	0	0,84	-150	1,6	+130	1,1	-45	1,1
	-600	0	0,84	+130	0,6	-125	1,1	+45	1,1
	0	+600	0,84	+150	1,1	-150	1,1	-50	1
	0	-600	0,84	-150	1,1	+150	1	+50	<1
	+400	+400	0,84	0	—	0	—	-65	1,7
	-400	-400	0,84	0	—	0	—	+60	1,6
	+600	-600	0,84	-200	<1	+200	<1	-20	<1
	-600	+600	0,84	+200	1,2	-200	1,2	-30	1,2

усиления. Структурная схема усилителя показана на рис.6, а его принципиальная схема – на рис.7. Как и в предыдущем варианте, на транзисторах Т1, Т2 и Т3 собрана часть усилителя для работы при температуре 4,2 К, а схемы стабилизации и регулировки собраны в узел, работающий при комнатной температуре. Данный вариант усилителя отличается от предыдущего введением схемы автоматического регулирования коэффициентом усиления за счет автоматического изменения соответствующего наклона проходной характеристики транзисторов Т1 и Т2. Применена схема автоматического регулятора с обратной связью, поддерживающего на выхо-

де усилителя амплитуду эталонного сигнала постоянной. Этим сигналом является гармонический сигнал низкой частоты, вырабатываемый генератором Г. В типичной петле автоматической регулировки усиления помимо быстродействующего усилителя /БУ/ и генератора /Г/ находятся: усилитель, отслеживающий рабочую точку /УР/, селективный усилитель /СУ/, схема детектирования /Д/ и управляющий усилитель /УУ/. В табл.2 представлены результаты испытаний усилителя на транзисторах КП350.

ВЫВОДЫ

Полученные результаты испытаний позволяют сделать следующие выводы относительно применения полевых транзисторов в быстродействующих импульсных усилителях, предназначенных для работы при низких температурах:

1. Транзисторы типа КП301Б и КП350 пригодны для применения в усилителях, работающих при температурах 4,2 и 77 К, при этом проверена их достаточно высокая надежность. В процессе испытаний каждый из 64 транзисторов подвергался 5-кратному охлаждению до 4,2 К и подогреву до 300 К и тем не менее ни один из них не вышел из строя, хотя никакие особые меры против термического удара не принимались.
2. Транзисторы КП350 требуют более тщательного подбора рабочей точки, чтобы исключить попадание в зону "вымораживания" и работу с небольшими наклонами характеристик. Транзисторы КП350 отличаются более высоким наклоном проходной характеристики при 4,2 К, чем КП301Б.
3. Высокочастотные параметры полевых транзисторов при 4,2 К не ухудшаются по сравнению с теми, что имеются при 300 К.

ДОПОЛНЕНИЕ

1. Кроме измерений, описанных выше, была сделана попытка съема характеристик биполярных транзисторов ГТ313А и П416Б для пяти экземпляров каждого типа. Ни один из этих транзисторов в температуре жидкого гелия не работал, хотя при 77 К они были работоспособны.
2. Так как биполярные транзисторы оказались работоспособными лишь при температуре 77 К, при ней испытывалось несколько вариантов усилителей, смонтированных на транзисторах П416Б и ГТ313А. Результаты испытаний оказались удовлетворительными, хотя следует отметить, что транзисторы ГТ313А показали себя значительно менее надежными в работе.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность сотрудникам криогенного отдела ЛВЭ ОИЯИ, оказавшим

большую помощь в выполнении данной работы, особенно В.И.Дацкову, а также В.И.Какуриной, М.Д.Евстигнеевой и Л.Г.Булаевой за техническую помощь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ваксенберг В.Я. и др. Электронная техника, 1974, серия 2, вып. 9 /81/.
2. Видинеев Ю.Д., Кабанов В.И. Элементы радиотехнических устройств при низких температурах. "Связь", М., 1980.
3. Богославский С.А., Соколов В.И. ПТЭ, 1982, №2, с. 200.

Рукопись поступила в издательский отдел
7 февраля 1983 года.

Маньяков П.К., Тлачала В., Тыкарски Л. 13-83-70
Усилители, предназначенные для работы при температуре 4,2 К

В работе представлены результаты испытаний полевых транзисторов КР301Б и КР350 при температурах 77 и 4,2 К, их переходные и выходные характеристики. Отмечено, что форма характеристик значительно изменяется, особенно при 4,2 К. Описывается эффект "вымораживания" транзисторов при 4,2 К, заключающийся в том, что вольт-амперные характеристики транзисторов имеют гистерезис на начальном участке. Испытания 43 образцов транзисторов КР301Б и 21 образца КР350 показали, что транзисторы надежно работают при температурах 77 и 4,2 К. Рассмотрены 2 типа усилителей, построенных на полевых транзисторах с коэффициентами усиления по мощности $\sim 2 \cdot 10^2$ и $\sim 5 \cdot 10^4$, временем установления выходного сигнала < 3 нс, входным сопротивлением 4 МОм и 10 МОм. Усилители предназначены для съема сигналов с пикап-электродов ускорителя на сверхпроводящих магнитах.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Manyakov P.K., Tlaczala V., Tykarski L. 13-83-70
Amplifiers for Operation at 4.2 K Temperature

Results of testing КР301В and КР350 field-effect transistors at 77 K and 4.2K temperatures, their drain and output characteristics are presented. It is noted that their shape changes sharply, especially at 4.2K. The transistor freezing effect at 4.2K is described when their volt-ampere characteristics have a hysteresis on the first part. Testing of 43 samples of КР301В transistors and of 21 samples of КР350 ones have shown that the transistors work successfully at 77K and 4.2K temperatures. Two types of amplifiers constructed on the field-effect transistors with $\sim 2 \cdot 10^2$ and $\sim 5 \cdot 10^4$ power gain, set-up time output signal < 3 ns, input impedance 4 MOhm and 10 MOhm are considered. Amplifiers are intended for registering signals from pick-up electrodes of an accelerator on superconducting magnets.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой.