

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РСФСР

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени  
авиационный институт имени академика С.П. Королева

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ПОРОГОВЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО  
ЭЛЕМЕНТА ПАМЯТИ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Утверждено редакционно-издательским  
советом института в качестве  
методических указаний к лаборатор-  
ной работе по курсу "Криогенная  
электроника

Куйбышев, 1989

У Д К 621.382.017.7.

В настоящих методических указаниях даны рекомендации по выполнению лабораторной работы. Приводятся необходимые сведения о поведении радиоэлементов в криогенных условиях.

Составители: Бояринцев В.И.  
Дмитриев В.Д.  
Зеленский А.В.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ** - исследование стабильности пороговых характеристик динамического элемента памяти при низких температурах.

**ЗАДАЧИ РАБОТЫ :**

1. Ознакомиться с поведением характеристик транзисторов и конденсаторов при низких температурах.
2. Ознакомиться с поведением характеристик биполярных транзисторов в статическом режиме при низких температурах.
3. Изучить зависимость тока через биполярный транзистор при питании от источника высокочастотного напряжения и ознакомиться с возможностями построения элемента памяти переменного тока.
4. Изучить схему и метод измерения пороговых характеристик элемента памяти при низких температурах.
5. Снять характеристику порогов включения и выключения динамического элемента при низких температурах.

## I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ

Охлаждение РЭА до криогенных температур <sup>\*)</sup> позволяет значительно улучшить ее параметры : снизить тепловые шумы, повысить добротность контуров и резисторов, повысить мощность РЭА при сохранении габаритов элементов и узлов.

Успехи физики привели к созданию принципиально новых сверхпроводниковых устройств / I /, работающих при криогенных температурах. Вместе со специальными узлами криогенной аппаратуры в ряде случаев оказалось целесообразным размещение в холодной зоне и обычных радиокомпонентов: резисторов, конденсаторов, полупроводниковых приборов и др.

В этой связи конструктору РЭА необходимо знать, как изменятся характеристики радиоэлементов при охлаждении.

I.I. Сведения о характеристиках пассивных радиоэлементов при низких температурах.

I.I.I. Резисторы. Важнейшими характеристиками резисторов в условиях низких температур являются: зависимость электрического сопротивления от температуры, допустимая мощность, уровень собственных шумов, стабильность.

---

<sup>\*)</sup> В соответствии с ГОСТ 21957-76 криогенной считается область температур 0...120 К.

Уровень собственных шумов резистора может быть оценен по напряжению шумов и определяется в первом приближении двумя составляющими / 2 / :

$$U_{ш} = U_{шт} + U_{шн}$$

Здесь  $U_{шт} = \sqrt{4kTR\Delta f}$  - напряжение тепловых шумов, В  
 $\Delta f$  - полоса частот, Гц  
 $U_{шн} = f^{-m}$  - низкочастотный шум  
 $m$  - коэффициент  
 $T$  - температура, К

Из формулы следует, что при понижении температуры первая составляющая уменьшается, тогда как низкочастотный шум практически не зависит от температуры.

Таким образом, напряжение собственных шумов резисторов на высоких частотах существенно снижается при понижении температуры.

Резисторы постоянного сопротивления разделяются на два класса: проволочные и непроволочные.

Общей тенденцией проводниковых материалов, из которых изготавливают проволочные резисторы, является уменьшение сопротивления при понижении температуры. При этом у некоторых проводников при  $T \approx 20\text{K}$  наблюдается скачкообразный переход в сверхпроводящее состояние. Проволочные резисторы, как правило, изготавливаются из провода малого диаметра (менее 0,1 мм) и при их охлаждении сказывается "размерный" эффект, проявляющийся в увеличении удельного сопротивления при уменьшении сечения проводника. Вследствие "размерного" эффекта уменьшение сопротивления проволочного резистора в зависимости от температуры происходит менее резко, чем у массивных проводников из того же материала.

Проволочные резисторы обеспечивают хорошую воспроизводимость при многократном охлаждении-отогреве после предварительной тренировки, состоящей из двух-пяти циклов, при этом достигается коэффициент стабильности.

$$K_s = 0,1 + 0,3\%$$

Непроволочные резисторы выполняются в виде пленок из резистивного материала, нанесенных на основу из диэлектрика или в виде объемных структур из композиций проводящих и непроводящих материалов.

Зависимости  $\Delta R/R = f(T)$  для некоторых типов непроволочных резисторов приведены на рис.1.

Разброс характеристик металлопленочных резисторов в области низких температур зависит от технологического режима их производства и может колебаться как от партии к партии, так и в пределах каждой партии. Типичный разброс характеристик одной партии резисторов типа ОМЛТ показан на рис.2.

Как видно из графика, в среднем разброс величины сопротивления резисторов типа ОМЛТ в интервале температур 300-100°K составляет менее 2 %.

1.1.2. Конденсаторы. Характеристики конденсаторов в основном определяются типом диэлектрика, используемого в них. Для работы в условиях низких температур наиболее пригодны конденсаторы с твердым неорганическим диэлектриком: именно этот вид конденсаторов и будет далее рассматриваться, так как их эксплуатационные параметры более стабильны.

На рис.3 представлена зависимость относительного изменения емкости  $C/C$  от температуры для нескольких типов конденсаторов в диапазоне 4,2 - 290 K / 2 / .

На рис.3А видно, что в зависимости от ТКЕ емкость керамических конденсаторов при понижении температуры до 20 и 4,2 K может изменяться от  $\pm 6$  до  $\pm 100$  % .

Из графиков рис.3Б видно, что наиболее стабильны следящие конденсаторы типа КСО: разброс их емкости в интервале температур 300 + 100 K составляет менее 2 % .

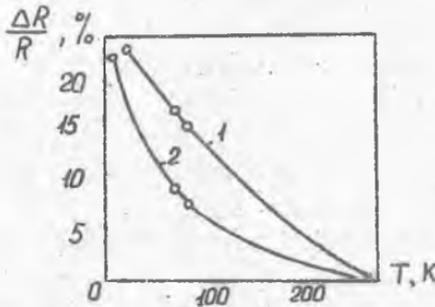


Рис.1. Характеристики непроволочных резисторов в зависимости от температуры  
1 - металлопленочный резистор типа ОМЛТ  
2 - композиционный резистор типа КЛМ

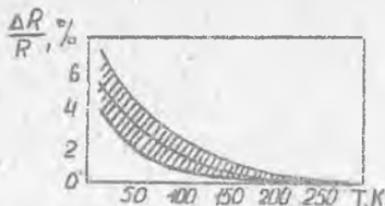


Рис.2. Разбор зависимостей  $\Delta R/R$  от температуры для металлопленочных резисторов типа ОМЛТ

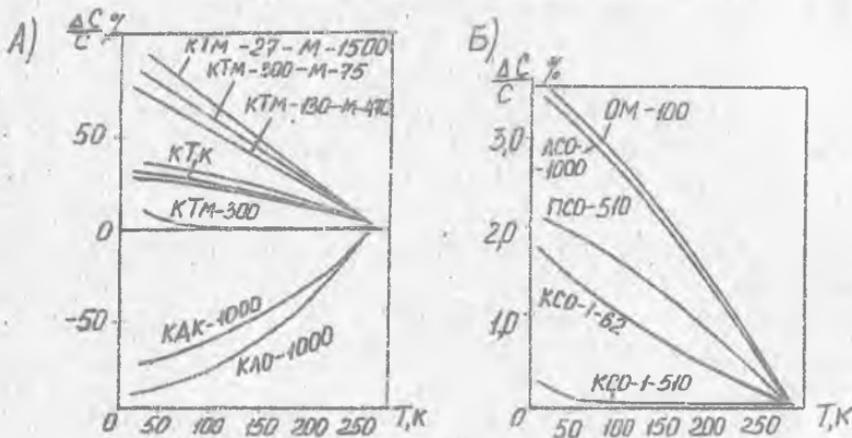


Рис.3. Зависимость относительного приращения емкости конденсаторов от температуры  
 А) керамические конденсаторы  
 Б) слюдяные и пленочные конденсаторы

1.2. Транзисторы при низких температурах (на постоянном токе).

Биполярный транзистор состоит из двух  $p-n$  переходов.

Свойства этих переходов при низких температурах полностью определяют характеристики транзистора.

Согласно / 1 / ток эмиттера при охлаждении транзистора равен

$$I_{\Sigma} = I_{S\Sigma} \left( \frac{qU_{\Sigma\beta}}{2\beta kT - 1} \right)$$

где  $I_{S\Sigma}$  - сумма обратного дырочного и электронного токов насыщения

$q$  - коэффициент пропорциональности

$\beta$  - эмпирический коэффициент нелинейности вольтамперной характеристики. Для комнатной температуры

$$\beta = 1.$$

$U_{эб}$  - напряжение между эмиттером и базой

$kT$  - тепловая энергия носителей заряда.

Зависимость тока  $I_{сэ}$  от  $T$  может быть описана выражением

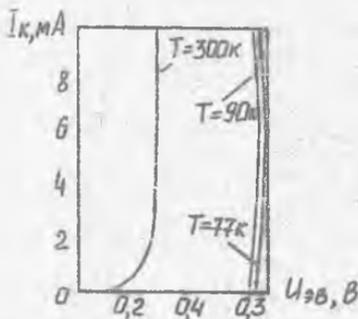
$$I_{сэ} = A e^{-\frac{\Delta E}{kT}}$$

где  $\Delta E$  - ширина запрещенной зоны,

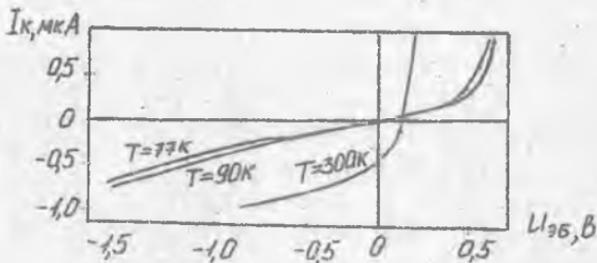
$A$  - постоянный коэффициент.

Из последнего выражения видно, что при охлаждении транзистора величина тока насыщения  $I$  уменьшается. Это приводит к смещению выходных характеристик транзистора. На рис.4 представлены статические характеристики одного экземпляра транзистора типа П416 Б, включенного по схеме в общий эмиттером. Характеристики снимались при коллекторном напряжении  $U_{к} = -5В$  для величин коллекторного тока  $I_{к} \leq 10 \text{ мА} / 2 \%$ .

А)



Б)



В)

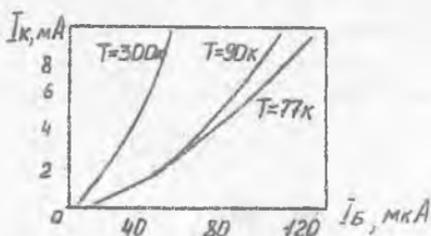


Рис.4. Статические характеристики дрейфового германевого р-п-р транзистора П416Б, включенного по схеме с общим эмиттером, при температурах 300, 90 и 77 К.

- А) характеристика вида  $I_k = f(U_{эБ})$ , режим больших токов  
 Б) характеристика вида  $I_k = f(U_{эБ})$ , режим микротоков для разнополярного напряжения  
 В) характеристика передачи тока  $I_k = f(I_{б})$

Согласно данным, приведенным в /2/, транзисторы типа П416Б должны сохранять свойства активных элементов вплоть до гелиевых температур ( до 4,2 К). При этом аномальных свойств транзистор не обнаруживает, причем абсолютные величины коэффициента передачи базового тока  $B = I_k/I_b$  при 90 и 77° К довольно высоки. Расчеты показывают, что при  $T = 20^{\circ}\text{K}$  коэффициент передачи будет иметь значения 28-38, а при  $T = 4,2^{\circ}\text{K}$  можно ожидать, что  $B = 24-26$ .

Согласно графикам, приведенным на рис.4 А,В, входная статическая ВАХ и статическая ВАХ для коллекторного тока при охлаждении транзистора в диапазоне 300-77°К сдвигаются вправо (в сторону увеличения значения  $U_{эБ}$ ). Это означает, что напряжение смещения на базе транзистора, обеспечивающее рабочую точку, выбираемую по току коллектора, должно быть больше, чем при комнатной температуре. Снижение коэффициента передачи базового тока  $B$  и уход рабочей точки транзистора в криогенных условиях ухудшают надежность работы радиоэлектронных схем.

### 1.3. Транзисторный элемент памяти.

В данной лабораторной работе исследуется элемент памяти, созданный на основе биполярного дрейфового транзистора с отключенным базовым выводом при питании от источника высокочастотного напряжения  $U_{н} / 3/$ .

Схема элемента памяти приведена на рис.5.

При питании дрейфового транзистора с отключенным базовым выводом от источника постоянного напряжения  $E_p$  (коллекторный  $p-n$  - переход смещен в обратном направлении) ток через транзистор протекает от эмиттера к коллектору (для  $П416Б$  типа).

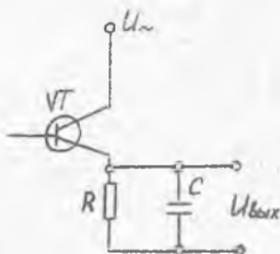


Рис. 5. Схема транзисторного элемента памяти

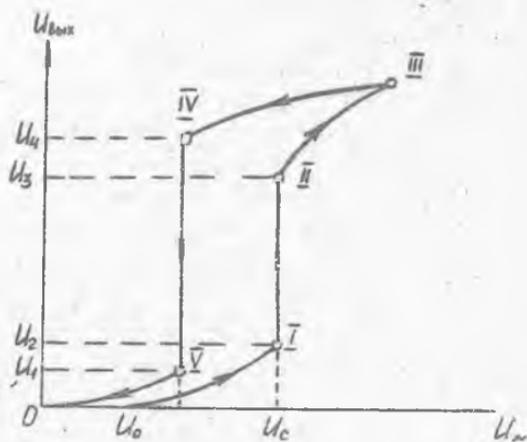


Рис. 6. Зависимость выходного напряжения транзисторного элемента памяти от напряжения питания

При этом для малых значений напряжения питания  $E_n$  величина тока, протекающего через транзистор, незначительна. При больших значениях  $E_n$  (например, для транзистора типа П416Б  $E_n = 35В$ ) наступает лавинный пробой коллекторного перехода транзистора. При этом ВАХ транзистора имеет падающий участок (область отрицательного сопротивления).

В динамическом режиме работы (при питании от источника высокочастотного напряжения  $U_n$  у биполярного дрейфового транзистора появляются свойства, отличающиеся от свойств, характерных для статического режима. Эти свойства зависят от амплитуды и частоты напряжения питания  $U_n$ , величин барьерных и диффузионных емкостей коллекторного и эмиттерного переходов транзисторов, а также от значений номиналов конденсатора и резистора, включенных в цепь его эмиттера. На частотах свыше 500 кГц зависимость тока через транзистор, а следовательно, и выходного напряжения элемента памяти, описывается

S - образной характеристикой (рис. 6). Для транзистора типа П416Б эта область характеристики наступает при амплитуде напряжения  $U_n$  менее 5 В.

При малых значениях амплитуды напряжения  $U_n$  ток через транзистор минимален и, следовательно, минимально падение напряжения на резисторе  $R$ . С увеличением амплитуды  $U_n$  наблюдается незначительный рост выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$ . (участок 0 - I на рис.6). При достижении значения  $U_2$  происходит скачок выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  от минимального значения  $U_2$  (точка I) до некоторой величины  $U_3$  (точка II). При дальнейшем увеличении амплитуды напряжения  $U_n$  выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  монотонно увеличивается (участок II-III).

Если теперь уменьшать амплитуду напряжения, то характеристика проходит через точки III и IV, причем в точке IV происходит скачок напряжения от максимального значения  $U_4$  до минимального значения  $U$  (точка V). Таким образом, характеристика  $U_{\text{вых}} = f(U_n)$  имеет гистерезисную зону, ширина которой определяется разностью амплитуд напряжений  $|U_4 - U_2|$ . При таком виде питания транзистора гистерезисная зона существует и по частоте напряжения питания  $U_n$ . При этом срыв характеристики (из точки IV в точку V) происходит при меньшем значении частоты напряжения питания.

При инверсном включении дрейфовых транзисторов (вывод эмиттера подключен к потенциальной шине генератора  $U_n$ , а коллектор - к резистору), положение характеристики, приведенной на рис.6, меняется на обратное (в отрицательную область  $U_{\text{вых.}}$ ) и несколько сдвигается вправо, что обусловлено несимметричностью  $p-n$  - переходов.

Используя гистерезисную зону зависимости выходного напряжения  $U_n$  от амплитуды и частоты напряжения питания (как при нормальном, так и при инверсном включении транзистора), можно построить простые и экономичные элементы памяти, логики и различные пороговые устройства. Существенным их преимуществом является стабильность пороговых характеристик как при высоких, так и низких температурах. В частности, для схемы (рис.5) транзистора типа П416Б уход значений порогов включения и выключения (в точках  $U_c$  и  $U_0$  соответственно) в интервале температур 300-77°K на частоте свыше 5 мГц менее 20 %.

## 2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Блок-схема исследования характеристики динамического элемента памяти приведена на рис.7.

Транзистор VT, резистор R и конденсатор C собраны в виде объемного монтажа на концах коаксиальных кабелей. Коаксиальные кабели и датчик температуры с выводами собраны в единый жгут, который в ходе эксперимента постепенно (дискретно) опускается в криостат, а генератор, вольтметр, осциллограф и измеритель температуры располагаются на рабочем столе.

## 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

3.1. Снять зависимости значений порогов включения и выключения  $U_0$  элемента памяти от температуры при трех фиксированных значениях частот питающего напряжения  $U_n$ : 1 мГц, 5 мГц и 8 мГц. Измерения порогов включения и выключения производятся в интервале 300...77 к через каждые 20...25 К.

Величины  $U_c$  и  $U_0$  определяются постепенным увеличением амплитуды выходного напряжения генератора от нуля до значения, при котором происходит скачок входного напряжения элемента памяти (ветвь 0, I, II, III на рис.6) и последующим уменьшением амплитуды (ветвь III, IV, V). Моменты скачков напряжения  $U_{\text{вых.}}$  определяются визуально по изображению сигнала на экране осциллографа. Напряжение  $U_c$  и  $U_0$  измеряются вольтметром.

3.2. Экспериментальные данные занести в таблицу.

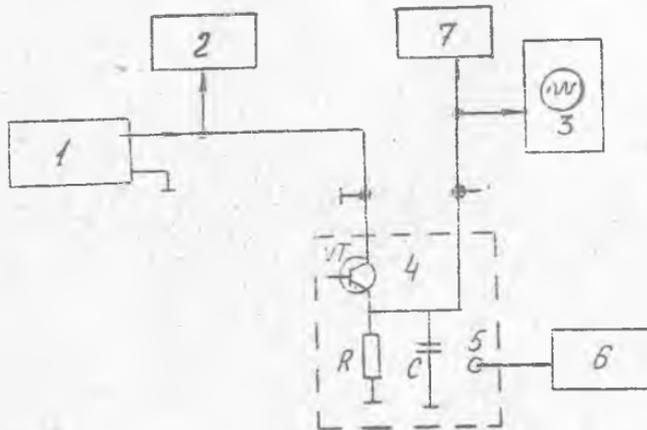


Рис. 7 . Схема исследования характеристики  
 $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$  транзисторного  
элемента памяти

- 1 - генератор синусоидального сигнала
- 2 - вольтметр
- 3 - осциллограф
- 4 - транзисторный элемент памяти
- 5 - датчик температуры
- 6 - измеритель температуры
- 7 - вольтметр

$R = 3 \text{ КОм}$  типа ОМЛТ;  $C = 1000 \text{ пф}$  типа КСО.

Таблица

Т, К	$f = 1 \text{ МГц}$		$f = 5 \text{ МГц}$		$f = 8 \text{ МГц}$	
	$U_{с,В}$	$U_{о,В}$	$U_{с,В}$	$U_{о,В}$	$U_{с,В}$	$U_{о,В}$
300						
275						
250						
225						
200						
175						
150						
125						
100						
77						

#### 4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

4.1. Нарисовать схему измерения выходных параметров динамического элемента.

4.2. По экспериментальным данным, приведенным в таблице, построить зависимости  $U_c = f_1(T)$  и  $U_o = f_2(T)$  для трех значений частот питающего напряжения.

4.3. Выводы.

#### 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Нарисуйте и объясните схему исследования динамического элемента.

2. Объясните температурные характеристики резисторов и конденсаторов.

3. Объясните экспериментальные зависимости.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Алфеев В.Н. Радиотехника низких температур. - М: Сов.радио, 1966. - 368 с.
2. Видинеев Ю.Д., Касанов В.И. Элементы радиотехнических устройств при низких температурах. - М.: Связь, 1980. - 96 с.
3. Дмитриев В.Д. Динамические вольтамперные характеристики транзисторов и их использование в построении элементов памяти и логики - в Сб.: Устройство, элементы и метод комплексной микроминиатюризации РЭА. - Казань: КАИ, 1981.- 14-18 с.

Подписано в печать 10.10.89  
Формат 60 x 84 1/16. Бумага белая офсетная.  
Усл.п.л. 1,0 Уч. - изд.л. 1,0 Т.100 экз.  
Заказ № 17. Бесплатно.

---

Уч. - к оперативной полиграфии КуАИ  
Куйбышев, Ульяновская, 18.