

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени авиационный
институт имени акад. С.П. Королёва
Кафедра "Конструирования радиоэлектронной аппаратуры"

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ПРИБОРОВ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Лабораторная работа по курсу "Криогенная электроника"

Утверждено редакционно-издательским
советом института в качестве мето-
дических указаний к лабораторной
работе для студентов по курсу
"Криогенная электроника"

Куйбышев, 1989

У Д К 621.328.017.7.

В настоящих методических указаниях даны рекомендации по выполнению лабораторной работы. Приводятся необходимые теоретические и экспериментальные сведения о поведении полупроводниковых приборов при криогенных температурах.

Составитель Бояринцев В.И.

В основу работы многих полупроводниковых приборов (диодов, биполярных транзисторов и др.) положено использование контакта двух примесных полупроводников с различным типом проводимости. Такой контакт получил название электронно-дырочного или $p-n$ перехода. Для обеспечения работоспособности прибора при низких температурах необходимо, чтобы при глубоком охлаждении $p-n$ переход сохранялся, а его свойства улучшались или же оставались неизменными. Одной из главных характеристик, определяющих параметры $p-n$ перехода и минимальную температуру, при которой он работоспособен, является проводимость использованного полупроводникового материала. Рассмотрение закономерностей измерений электропроводности полупроводников в зависимости от температуры позволяет глубже понять и правильное интерпретировать поведение полупроводниковых приборов при охлаждении и работе при криогенных температурах.

1. ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

В отличие от металлов полупроводники характеризуются более низкой проводимостью. Это объясняется меньшим числом свободных носителей заряда (электронов и дырок) в кристалле полупроводника. На языке зонной теории это означает, что валентная зона, полностью занятая электронами, и свободная зона проводимости отделены друг от друга узким интервалом энергии Δ (запрещенной зоны шириной Δ), (рис.1)

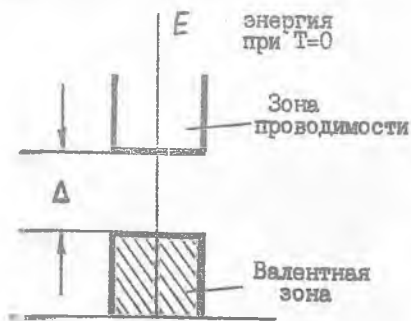


Рис. 1

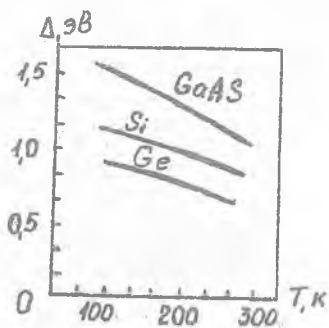


Рис. 2

В общем случае ширина запрещенной зоны зависит от температуры. Эта зависимость объясняется двумя причинами:

1). Уменьшением амплитуды тепловых колебаний кристаллической решетки при охлаждении;

2). Изменением межатомных расстояний в зависимости от температуры.

У многих материалов, применяющихся в полупроводниковой технологии, изменение ширины запрещенной зоны составляет около 10% при изменении температуры от 0 до 300 К (рис. 2). Как правило, эффект оказывает лишь вторичное воздействие на проводимость полупроводников, поэтому можно принять $\Delta = const$

Существует два типа полупроводников:

1). Собственные полупроводники (химически чистые);

2). Примесные полупроводники, содержащие небольшие количества искусственно введенных примесей.

Влияние примесей очень сильно сказывается на температурной зависимости проводимости полупроводника, поэтому рассмотрим отдельно электрические свойства собственных и примесных полупроводников при различных температурах.

Собственные полупроводники

Удельное сопротивление собственных полупроводников при уменьшении температуры возрастает по экспоненциальному закону:

$$\rho = \rho_0 \exp(\Delta/KT) \quad (1)$$

где ρ_0 - величина постоянная для данного полупроводника,

Δ - ширина запрещенной зоны,

K - постоянная Больцмана.

Величина KT представляет собой среднее значение тепловой энергии, которая возбуждает носители заряда.

Формула (1) показывает, что удельное сопротивление полупроводника зависит от соотношения между шириной запрещенной зоны и тепловой энергией носителя заряда. Величина этого соотношения всегда значительно больше единицы. Например, при комнатных температурах $KT \approx 0,03$ эВ, а $\Delta \approx 1$ эВ, т.е. величина Δ превышает KT примерно на два порядка. Тем не менее, при этом количество носителей заряда оказывается достаточно большим для того, чтобы в полупроводнике циркулировал собственный ток.

Величина этого тока μ определяет электропроводность полупроводника как твердого тела.

При криогенных температурах количество носителей, способных преодолеть запрещенную зону, резко уменьшается, вследствие чего удельное сопротивление полупроводника экспоненциально возрастает. В частности, при температуре жидкого азота (77 К) величина kT меньше Δ уже на 3-4 порядка и это в соответствии с формулой (1) ведет к возрастанию удельного сопротивления на 30-40 порядков. Большая величина удельного сопротивления материала равнозначна полной потере проводимости.

Таким образом, при криогенных температурах собственные полупроводники превращаются в диэлектрики. Такое явление получило название "вымораживание носителей".

Примесные полупроводники.

Примесные полупроводники подразделяются на две группы:

- 1). n - типа, в которых основными носителями зарядов являются электроны;
- 2). p - типа, в которых основными носителями зарядов являются дырки.

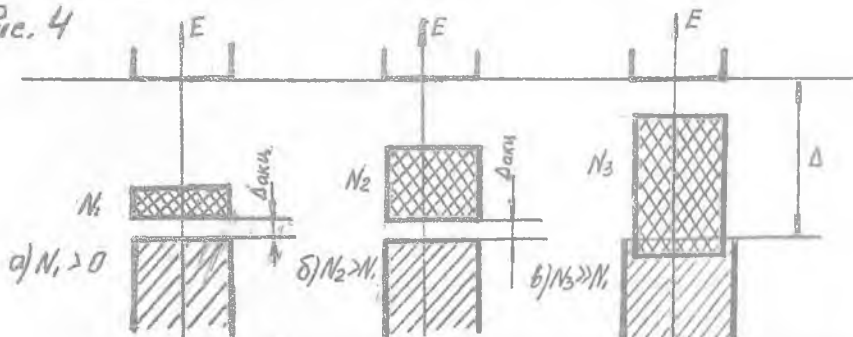
В примесных полупроводниках между валентной зоной и зоной проводимости существуют так называемые примесные зоны, ширина которых зависит от количества примесей. Например, для полупроводников n - типа в зависимости от количества примеси зонная структура может выглядеть следующим образом (рис. 3).



Рис. 3

В этих полупроводниках шириной запрещенной зоны является величина $\Delta_{дон}$ между верхней гранью примесного (донорного) уровня и нижней границей зоны проводимости. Аналогичная картина наблюдается и в полупроводниках с дырочкой проводимостью (р-типа), но в этом случае шириной запрещенной зоны является разность энергий между нижней границей примесной зоны и верхней границей валентной зоны (рис. 4)

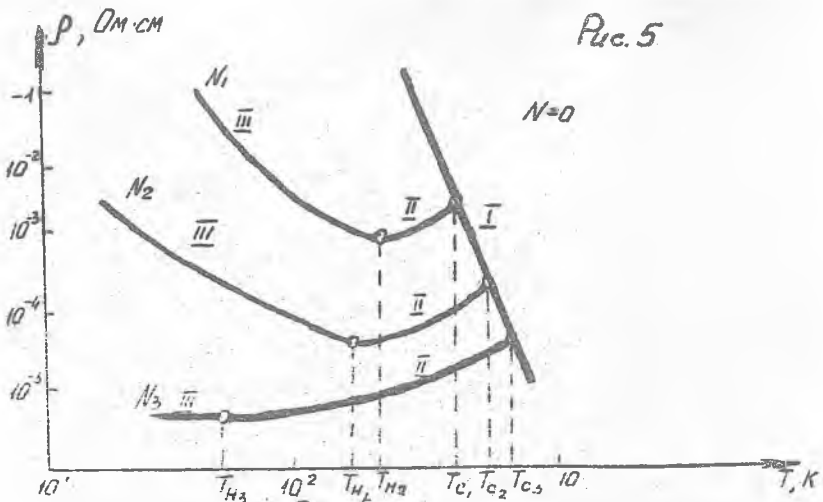
Рис. 4



Таким образом, у примесных полупроводников ширина запрещенной зоны оказывается меньше, чем у собственных полупроводников. Величина $\Delta_{дон}$ и $\Delta_{акц}$ имеют значения $\approx 0,05$ эВ, примерно на два порядка ниже, чем Δ . Это означает, что для переброса электронов из валентной зоны в зону проводимости и примесных полупроводниках требуется энергия примерно в 100 раз меньше, чем ширина запрещенной зоны Δ , и это определяет меньшее удельное сопротивление примесных полупроводников по сравнению с собственными.

Различная ширина запрещенных зон $\Delta_{дон}$ или $\Delta_{акц}$ в примесных полупроводниках определяет различный характер поведения полупроводникового материала при низких температурах.

Типичная зависимость удельного сопротивления примесного полупроводника (легированный кремний) от температуры дана на рис. 5.



Как видно, удельное сопротивление ρ полупроводника с различным количеством примеси N может претерпевать существенные изменения, имея минимум в определенном диапазоне температур и неограниченное возрастание при приближении к абсолютному нулю. Однако при больших концентрациях примеси неограниченного роста ρ при $T \rightarrow 0$ не наблюдается. На кривой зависимости $\rho(T)$ можно выделить три характерных участка I, II, III, границами которых являются два характерных значения температуры:

T_C — температура перехода к собственной проводимости,
 T_H — температура истощения примеси.

Разным концентрациям примеси N соответствует различные значения этих температур.

На участке I ($T > T_C$) наблюдается сильное тепловое возбуждение собственных носителей в полупроводнике, концентрация которых значительно выше, чем примесных носителей. Поэтому в области высоких температур величина удельного сопротивления в основном определяется собственной проводимостью материалов. У собственных же полупроводников при понижении T величина экспоненциально возрастает (см. формулу I).

На участке II ($T_C > T > T_H$) заметного увеличения не происходит. Хотя энергия теплового возбуждения оказывается недостаточной для переброса электронов из валентной зоны в зону

проводимости, но все атомы примеси ионизированы. Это позволяет примесным носителям преодолеть запрещенную зону $\Delta_{\text{акт}}$ или $\Delta_{\text{зон}}$, вследствие чего величина ρ несколько снижается.

В точке T_H при малой концентрации примеси начинается ее "истощение", т.е. вымораживание примесных носителей заряда. Число носителей, способных преодолеть запрещенную зону, резко сокращается и поэтому удельное сопротивление полупроводника экспоненциально растет по мере приближения к абсолютному нулю.

При больших концентрациях примеси ($N_3 \gg N_1$) вымораживание носителей не происходит и, как следствие, неограниченное возрастание ρ не имеет места.

2. P-n ПЕРЕХОД ПРИ НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

P-n переход образуется внутри монокристалла полупроводника, в одну часть которого введена донорная примесь, а в другую - акцепторная.

Для математического описания вольтамперной характеристики перехода при нормальных температурах используют теорию Шокли, в соответствии с которой при постоянной температуре ток через переход экспоненциально зависит от приложенного напряжения

$$i : \quad i = I_{\text{обр}} [\exp(eU/\beta kT) - 1]$$

где $I_{\text{обр}}$ - обратный (тепловой) ток

e - заряд электрона

k - постоянная Больцмана

β - коэффициент, характеризующий нелинейность вольтамперной характеристики.

Чем меньше коэффициент β , тем больше крутизна и нелинейность вольтамперной характеристики перехода, тем лучше переход. У идеального (теоретического) перехода $\beta = 1$. Величина коэффициента β в основном определяется технологическими факторами: типом применяемых исходных материалов и примесей, методом получения и обработки исходных материалов, концентрацией примесей и т.д.

Рассмотрение зависимостей электропроводности полупроводника от температуры показало, что механизм его проводимости обусловлен тепловым возбуждением носителей заряда. При слабом тепловом возбуждении и малой концентрации примеси полупровод-

ник превращается в диэлектрик. Поэтому р-п переходы, а значит и приборы, выполненные на их основе, удовлетворительно работают только до определенной граничной температуры.

3. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ ПРИ НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Граничной температурой обычных полупроводниковых диодов (специально не предназначенных для работы в условиях криогенных температур) чаще всего является температура жидкого азота (77 К). Понижение температуры до 77 К приводит:

- 1). К сдвигу вольтамперной характеристики диода вправо на величину $0,5 \dots 1$ В,
- 2). К возрастанию крутизны вольтамперной характеристики,
- 3). К возрастанию коэффициента β
- 4). К значительному (на несколько порядков) увеличению обратного тока,
- 5). К увеличению разброса вольтамперных характеристик партии диодов.

При температурах жидкого гелия ($T=4,2$ К) возможен лавинный пробой диода.

К приборам, у которых температурный интервал работы много шире, чем у обычных диодов, относятся туннельные диоды. Их работа основана на туннельном прохождении электрона из одной области полупроводника в другую. При этом, согласно законам квантовой механики, электрон не расходует своей энергии и может совершать переход даже при отсутствии теплового движения (вблизи абсолютного нуля). Для туннельных диодов используется сильно легированный материал. При этом полупроводник становится вырожденным (рис. 3в, 4в). Особенностью вырожденных полупроводников, образующих р-п переход у туннельного диода, является то, что примесные уровни у них размыты в примесную зону, перекрывающую ближайшую зону. Таким образом, явление вымораживания носителей при охлаждении туннельного диода не должно наблюдаться. Результаты экспериментальной проверки подтверждают это.

4. ТРАНЗИСТОРЫ ПРИ НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Поведение транзистора при низких температурах в принципе определяется рассмотренными ранее закономерностями. Однако, на конкретный вид зависимости параметров транзистора от температуры значительное влияние оказывает технология изготовления (сплавной, диффузионный, эпитаксиальный и т.д.) и степень лагирования материала примесями. Поэтому решить вопрос о возможности использования транзисторов того или иного типа можно лишь на основе низкотемпературного эксперимента с последующим регрессионным анализом полученных данных. Можно отметить следующие особенности транзисторов:

1. Большинство из них сохраняют работоспособность до азотных температур, но не работают при гелиевых. Основная причина - вымораживание носителей. Это характерно для германиевых транзисторов, но еще более для кремниевых, у которых вымораживание наблюдается при более высоких температурах.

2. Вольтамперные характеристики транзисторов при охлаждении изменяются, а следовательно, изменяются и усилительные свойства транзисторов. Работа транзисторов в условиях криогенных температур требует изменения их электрических режимов по сравнению с нормальными условиями, так как

а/ существенно (в несколько раз) уменьшается коэффициент передачи базового тока;

б/ выходные характеристики $I_B(U_{BE})$ смешаются как и у диодов вправо. Крутизна этих характеристик возрастает, что эквивалентно значительному (до 10 раз) уменьшению входного сопротивления;

в/ семейство выходных характеристик $I_C(U_C)$ при понижении температуры сжимается;

г/ граничная частота усиления по схеме с общим эмиттером изменяется в 1,5...2 раза.

При работе в среде криогенных жидкостей усугубляется влияние несовершенства конструктивного выполнения полупроводниковых приборов. Сам процесс погружения прибора в криогенную жидкость эквивалентен воздействию на него теплового удара с высоким значением отрицательного градиента температуры. След-

ствии этого возникает механические напряжения в деталях крепления и в самом кристалле, которые могут привести к выходу прибора из строя.

5. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является экспериментальное изучение зависимости статистических вольтамперных характеристик полупроводниковых приборов от температуры и приобретение практических навыков низкотемпературного эксперимента.

6. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

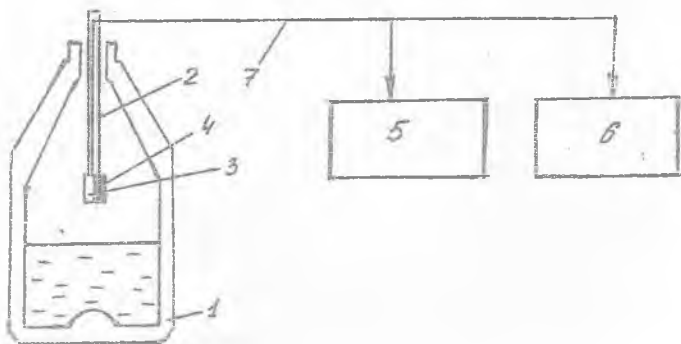


Рис. 6

- сосуда Дьюара I с жидким азотом;
- штанги 2 из теплоизоляционного материала с закрепленными на ней исследуемыми полупроводниковыми приборами 3 и датчиками температуры 4;
- характеристикографа 5 типа *TR* - 4805;
- индикатора температуры 6;
- соединительных проводников 7.

Изменение рабочей температуры полупроводниковых приборов производится путем постепенного опускания штанги в пары жидкого азота, находящегося в сосуде Дьюара. Контроль температуры осуществляется с помощью датчика температуры (терморезистора или термопары), закрепленного в непосредственной близости от полупроводниковых приборов, и индикатора температуры.

Характериограф ТР-4805, предназначен для получения и наблюдения на экране электронно-лучевой трубки вольтамперных характеристик радиоэлементов (резисторов, полупроводниковых диодов, стабилитронов, тиристоров, биполярных транзисторов малой и большой мощности, полевых транзисторов). Измерение параметров транзисторов производится по схеме с общим эмиттером (источком).

Принцип действия характериографа при измерении выводных характеристик транзистора поясняется рис. 7.

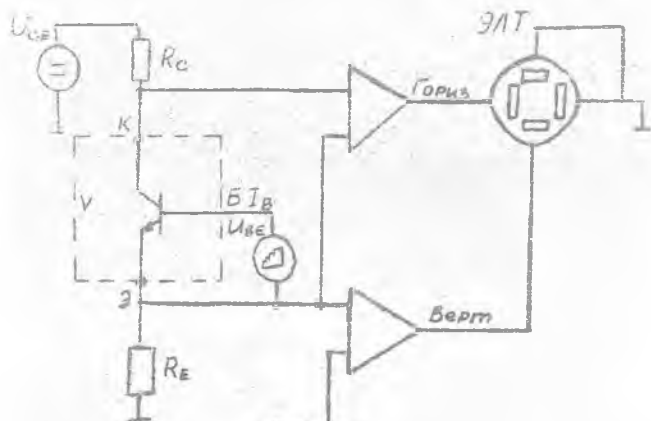
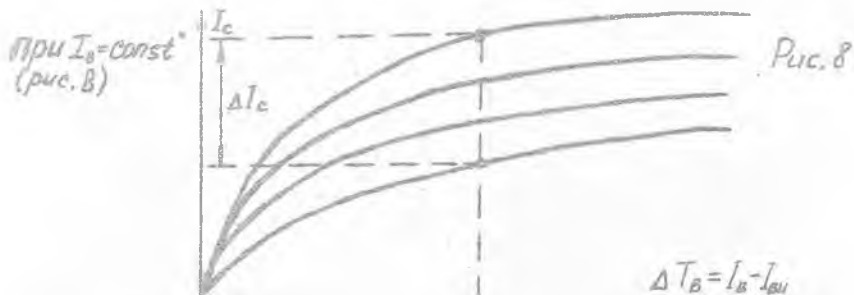


Рис. 7

Управляющий ток базы I_B исследуемого транзистора вырабатывается генератором периодического ступенчатого напряжения U_{BE} с регулируемым числом ступенек. Величина ступеньки фиксирована и определяется положением переключателя *STEPAMPLITUDE* на передней панели характериографа.

Коллекторное напряжение создается блоком питания характериографа. Напряжение U_c , снимаемое с коллектора испытуемого транзистора, управляет горизонтальным движением луча, электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) характериографа. Коллекторный ток транзистора создает падение напряжения на эталонном резисторе $R_E \ll R_c$, которое затем усиливается и подается на вертикальные отклоняющие пластины ЭЛТ. В результате на экране ЭЛТ изображается семейство выходных характеристик транзистора $I_c = f(U_c)$



Назначение органов управления характеристикографом, порядок включения и выполнения измерений приведены в Приложении.

7. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить правила пользования характеристикографом ТН - 4805 (см. Приложение).
2. Получить разрешение преподавателя на включение аппаратуры.
3. Подключить используемые полупроводниковые приборы (транзистор и диод) к измерительной головке *TEST ADAPTER* характеристикографа. Тип полупроводниковых приборов, подлежащих исследованию, определяет преподаватель после допуска студентов к работе.
4. Получить на экране характеристикографа семейство выходных характеристик транзистора (2...4 характеристики при различных токах базы), а также прямую ветвь вольтамперной характеристики полупроводникового диода при нормальной температуре.
5. Записать положения органов управления характеристикографом, определяющих рабочую точку испытуемого полупроводникового прибора:
NOV. VOLTS/DIV, VERT. CURRENT/DIV, STEP AMPLITUDE.
6. Нарисовать характеристики полупроводниковых приборов.
7. Определить напряжение отсечки диода и записать его значение.
8. Рассчитать статический коэффициент передачи базового тока транзистора по формуле $B = \Delta I_C / \Delta I_B$
где ΔI_C - приращение коллекторного тока,
 ΔI_B - приращение базового тока транзистора
Величины ΔI_C и ΔI_B определяются из статистических характеристик транзистора (рис. 8) с учетом положения органов управления характеристикографом *STEP AMPLITUDE, VERT. CURRENT/DIV.*
9. Спустить штангу с закрепленными на ней элементами на некоторую глубину в сосуд с жидким азотом, зафиксировать положение штанги стабилизации показаний индикатора температуры.

10. Измерить температуру испытуемых полупроводниковых приборов, воспользовавшись калибровочной зависимостью сопротивления терморезистора (или зависимостью ЭДС термопары) от температуры и записать значение температуры.

11. Повторить операции, указанные в п.7...10 для нескольких значений температуры (через каждые 20...25 к) вплоть до полного погружения испытуемого прибора в жидкий азот.

12. Полученные экспериментальные данные оформить в виде таблиц.

13. По экспериментальным данным построить графики зависимостей

$$U_0 = f_1(T) \quad B = f_2(T)$$

8. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

В отчете по данной лабораторной работе должны содержаться:

- цель исследования,
- схема лабораторной установки.
- таблица с экспериментальными данными,
- графики зависимостей характеристик полупроводниковых приборов от температуры;
- выводы по результатам работы.

9. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните физический смысл явлений, протекающих в полупроводниках при низких температурах.
2. Объясните характер зависимости удельного сопротивления полупроводника от температуры.
3. Каковы особенности работы р-п переходов при глубоком охлаждении?
4. Какие изменения параметров полупроводниковых диодов происходят при низких температурах ?
5. Какие изменения параметров транзисторов происходят при низких температурах ?
6. Объясните характер зависимостей $U_0 = f(T) \quad B = f(T)$
7. Объясните принцип отображения вольт-темперных характеристик полупроводникового прибора на экране характериографа.

ПРАВИЛА ПОЛЬЗОВАНИЯ ХАРАКТЕРИОГРАФОМ

I. ОРГАНЫ УПРАВЛЕНИЯ

Назначение органов управления, расположенных на лицевой панели характеристикографа ТР - 4805, дано в табл.

Таблица

Надпись на лицевой панели I	Назначение
<i>MAINS OFF</i>	Сетевой выключатель
<i>SCALE ILLUM</i>	Регулировка освещения шкалы (совмещена с выключателем сети)
<i>INTENSITY</i>	Регулятор яркости изображения
<i>FOCUS</i>	Регулятор фокусировки луча
<i>ASTIGM</i>	Регулятор астигматизма луча
<i>HOR. POS</i>	Регулировка горизонтального смещения изображения
<i>VERT. POS</i>	Регулировка вертикального смещения изображения
<i>VERT. CURRENT/DIV</i>	Переключатель коэффициента усиления по вертикале. При положении <i>VERT. CURR</i> управляющий сигнал на базу испытуемого элемента не подается
<i>HOR VOLTS/DIV</i>	Выполняет 3 функции: <ol style="list-style-type: none"> 1. переключение коэффициента усиления по горизонтали 2. переключение напряжения питания испытуемого элемента 3. обеспечивает управление сигнальными лампами <i>WATTS PICK</i> индицирующими пределы мощности рассеяния
<i>SERIES RESISTOR</i>	Устанавливает величины сопротивле-

ний резисторов, предназначенных для защиты испытуемого элемента от перегрузки

Переключатели *SERIES RESISTOR* и *HOR VOLTS/DIV* совместно устанавливают мощность рассеяния испытуемого прибора, поэтому они механически связаны друг с другом и вместе управляют сигнальными лампами

VARIABLE

Плавная регулировка напряжения питания испытуемого элемента, начиная с нуля вольт

COLLECTOR SUPPLY $\pm DC \pm AC$

Переключение режима работы и полярности питания испытуемого элемента

V_{CE} ; V_{BE}

Подключение напряжения между выводами коллектор-эмиттер или база-эмиттер к усилителю отключения ЭЛТ

STEP AMPLITUDE

Установка амплитуды ступеньки напряжения или тока базы испытуемого полупроводникового прибора

STEP POL

Переключение полярности управляющих сигналов базы

BASE STEPS

Установка числа ступенек напряжения или тока, поступающих на базу испытуемого полупроводникового прибора

OFFSET

Смещение характеристики испытуемого полупроводникового прибора в рабочую точку с нулевым током или с нулевым напряжением

ONE CURVE

Изображение на экране ЭЛТ семейства кривых (кнопка *ONE CURVE* отжата)

CATE CHECK

LOOPING COMP

← *OFF* →

или одной кривой (кнопка нажата)

Контроль тока затвора полевых транзисторов

Компенсация действия помех, вызванных паразитной емкостью при исследовании характеристик полупроводниковых приборов в рабочей точке с малым током

Подключение напряжений, установленных органами управления характеристриографа, к выводам испытываемых полупроводниковых приборов, расположенных в колодке

2. ЗАЩИТА ПРИБОРА И ИСПЫТУЕМОГО ЭЛЕМЕНТА

ЗАПРЕЩАЕТСЯ использовать прибор для целей, отличных от его назначения, например, для испытания на пробой или для продолжительных испытаний элементов при повышенных напряжениях.

Переключатели *HOR.VOLTS/DIV* и *COLLECTOR SUPPLY±DC±AC* разрешается переключать только в нулевом состоянии переключателя *COLLECTOR SUPPLY; VARIABLE*

Запрещается устанавливать коллекторный ток больше 2 А !

Запомните:

1. Изменение напряжения рабочей точки испытываемого полупроводникового прибора производится переключателями *COLLECTOR SUPPLY; VARIABLE* и *HOR.VOLTS/DIV*

2. Изменение тока рабочей точки испытываемого полупроводникового прибора производится переключателями *STEPAMPLITUDE* *BASE STEPS* и *SERIES RESISTOR*

Кроме того, необходимо следить за положением двух переключателей полярности *COLLECTOR SUPPLY±DC±AC* и *STEP POL*

так как их неправильное положение может привести к повреждению прибора.

3. ВКЛЮЧЕНИЕ И ПРОВЕРКА РАБОТСПОСОБНОСТИ

Включение прибора производится сетевым выключателем *MATS OFF*. Через 2–3 минуты прибор готов к работе. При этом ручка *COLLECTOR SUPPLY VARIABLE* должна быть повернута против часовой стрелки до упора, а выключатель $\leftarrow OFF \rightarrow$ — в среднем положении.

Появившуюся на экране светящуюся точку помещают в нижний левый угол координатной сетки и в дальнейшем считают эту точку началом координат.

Положение переключателя *SERIES RESISTOR* целесообразно выбрать минимально возможным, исходя из допустимой мощности рассеивания, чтобы коллекторное напряжение изменялось по возможности мало. В случае пробоя защиты испытуемого прибора осуществляет резистор *SERIES RESISTOR*. Его значение определяется допустимым максимальным током исследуемого прибора.

С помощью выключателя *OFF* на испытуемый элемент подключается напряжение.

Ручкой *COLLECTOR SUPPLY VARIABLE* в соответствии с положением переключателя *HOR.VOLTS/DIV* на коллектор транзистора можно подключить напряжение, нарастающее от нуля.

Коллекторный ток транзистора можно изменять переключателем Масштаб тока коллектора можно выбрать при помощи переключателя пределов измерения *VERT CURRENT/DIV*

Переключателем *BASE STEPS* устанавливается число кривых снимаемой характеристики.

При нажатом состоянии кнопки *ONE* вместо семейства кривых изображается одна кривая, устанавливаемая переключателем *BASE STEPS*. Нижняя из семейства кривых при правильной установке потенциометра *OFFSET* означает основную (нулевую) линию.

При помощи потенциометра *OFFSET* можно установить кривую, соответствующую нулевому базовому току. Для этого поворотом потенциометра первая кривая смещается вниз до тех пор, пока она поддается регулировке. В положении *NO BASE STEPS* переключателя пределов измерения *VERT.CURRENT* на базу испыту-

емого элемента не подается управляющее напряжение.

Установку точки на начало координат осуществляют потенциометрами *INTENSITY, FOCUS, ASTIGM, HOR. POS, VERT. POS*

После этого необходимо выполнять следующие действия.

Переключатель *HOR. VOLTS/DIV* поставить в положение 2/1 к, переключатель *BASE STEPS* — в положение 10. На усилитель горизонтального отклонения в положении V_{BE} переключателя V_{CE}, V_{BE} нужно подать сигнал 2В соответствующим переключателем *STEP AMPLITUDE*

При этом на экране вычерчивается 10 светящихся точек. Если они появляются на экране, то генератор ступенек и усилитель горизонтального отклонения работают правильно. При изменении положения органов управления *STEP AMPLITUDE, HOR. VOLTS/DIV, BASE STEPS* изображение на экране ЭЛТ должно изменяться соответствующим образом. Орган управления *ONE CURVE* действует лишь при установке числа ступенек больше двух.

4. ВЫПОЛНЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Переключатели *COLLECTOR SUPPLY ±DC ±AC* и *STEP POL* следует установить в положения, соответствующее типу транзистора, вставленного в измерительную колодку *TEST ADAPTER*. Переключатель *STEP AMPLIT* целесообразно установить в положение наименьшего управляющего тока базы. Выбрать положение переключателей *VERT. CURRENT/DIV, HOR. VOLTS/DIV*, а также значение *SERIES RESIS* в зависимости от испытываемого транзистора. Максимальная мощность рассеяния определяется совместно напряжением горизонтального отклонения и значением последовательного сопротивления, и индицируется сигнальными лампами (при максимальной мощности рассеивания 0,1 Вт ни одна из сигнальных ламп не горит).

Этот предел служит для измерения обратных токов диодов, а также для измерения прочих токов утечки и обратных токов.

При установке малой величины коллекторных токов (в случае необходимости) потенциометром *LOOP IN* можно скомпенсировать действие помех.

Различие между измерением характеристик транзисторов типа р-р-р и п-р-п заключается лишь в полярности коллекторного напряжения, устанавливаемой переключателем *COLLECTOR SUPPLY*

и полярности управляющего сигнала *STEP POL*, устанавливаемом соответствующим тумблером.

При ~~виде~~ изображаемых на ЭЛТ кривых более 4 допускаются дрожание изображения. В правой части экрана концы отдельных кривых иногда связаны между собой, что не является свойством транзистора, а определяется схемными особенностями характеристики графа. При анализе указанные обстоятельства не должны учитываться.

ЛИТЕРАТУРА

1. Епифанов Г.И., Мома Ю.А. Физические основы конструирования и технологии РЭА и ЭВА. -М.: Сов.радио, 1979. -352 с.
2. Видинеев Ю.Д., Кабанова В.И. Элементы радиотехнических устройств при низких температурах. -М.: Связь, 1980, -96 с.
3. Алфеев В.Н. Полупроводники, сверхпроводники и параэлектрики в криоэлектронике. -М.: Сов.радио, 1979. -408 с.

Подписано в печать 10.10.89г.

Формат 60 x 84 1/16. Бумага белая офсетная.

Усл.п.л. 1,2. Уч.-изд.л. 1,0. Т. 100 экз.

Заказ № 15. Бесплатно.

Уч-к оперативной полиграфии КуАИ,

Куйбышев, Ульяновская, 18.