

ФГБОУ ВО «Ярославский государственный педагогический
университет им. К.Д. Ушинского»

Н.М. СОКОЛОВ, С.С. ФЕФЕЛОВ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО РАДИОТЕХНИКЕ

Часть 1

ЭЛЕКТРОННЫЕ ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

Учебное пособие для студентов

Издание второе, переработанное

Ярославль
2016

Коррекция второго издания — В.К. Мухин

Компьютерная верстка — Е.Н. Шевелева

© ФГБОУ ВПО «Ярославский
государственный педагогический
университет им. К.Д. Ушинского»,
2016

ПРЕДИСЛОВИЕ

В совершенствовании учебного процесса важное место принадлежит повышению эффективности лабораторных занятий. Эта форма обучения больше, чем любая другая, позволяет достичь единства теории и практики. Большое значение при этом имеют и специальные учебные пособия, облегчающие студентам подготовку и выполнение лабораторных работ.

Настоящее учебное пособие предназначено для студентов физических специальностей педагогических институтов и представляет собой первую часть руководства к лабораторному практикуму по радиотехнике.

Пособие содержит описание лабораторных работ по электронным лампам, ионным и полупроводниковым приборам. Каждый раздел имеет краткую теоретическую часть, вполне достаточную для подготовки и качественного выполнения задания. Особое внимание уделено полупроводниковым приборам. Для каждой работы указаны ее цель, рекомендуемая литература, описание схем исследования, порядок выполнения работы, содержание отчета и контрольные вопросы.

Составленное в таком плане пособие удобно в тех случаях, когда проведение лабораторных занятий опережает (полностью или в отдельных частях) прочитанный на лекциях материал. Особенно полезно такое пособие студентам-заочникам.

Форма описаний лабораторных работ предусматривает работу каждого студента (или бригады из 2—3 чел.) по индивидуальным заданиям. Вариант определяется выдаваемой преподавателем карточкой. Примеры карточек-заданий к работам приведены в приложении.

В зависимости от программы количество и перечень работ, а также объем лабораторного задания могут быть сокращены по усмотрению преподавателя.

Авторы надеются, что настоящее пособие не только поможет студентам в подготовке и выполнении лабораторных исследований, но и стимулирует изучение теоретических разделов курса радиотехники, облегчая подготовку к экзаменам.

Правила выполнения лабораторных работ

Лабораторные работы выполняются бригадами в составе 2—3 студентов в часы, предусмотренные расписанием. Очередность работ определяется графиком. Для самостоятельных занятий лаборатория открыта в специально отведенное время.

Перед проведением лабораторных работ студенты получают инструктаж по правилам техники безопасности, которые обязаны строго соблюдать.

При подготовке к работе каждый студент должен:

- а) Ознакомиться с описанием работы и изучить теоретические положения, на которых данная работа базируется.
- б) Продумать схему и назначение приборов и элементов установки, уяснить последовательность операций при наблюдениях и измерениях.
- в) Продумать оформление отчета, форму таблиц с результатами измерений, вид и масштаб графиков и схем.

Выполнению каждой работы в лаборатории предшествует проверка преподавателем подготовленности студента.

При выполнении работы следует:

- а) Ознакомиться с рабочим местом, установить наличие необходимой аппаратуры и принадлежностей и проверить соответствие их предусмотренным измерениям.
- б) Собрать схему работы и представить ее для проверки преподавателю, ведущему занятие, получить от него указания (задание).
- в) Лабораторные работы выполнять согласно описанию.
- г) После окончания работы выключить источники питания, радиоизмерительные приборы и привести рабочее место в порядок.

Работа считается законченной после просмотра черновика отчета преподавателем.

Требования к отчету по лабораторной работе:

- а) Отчет оформляется на стандартных листах бумаги (с одной стороны листа); графики строятся на миллиметровой бумаге, осциллограммы фотографируются и распечатываются; схемы и другие чертежи выполняются в соответствии с требованиями ГОСТов.
- б) Содержание отчета, кроме наименования работы, ее номера и цели, определяется описанием работы.
- в) Отчет принимается преподавателем на следующем лабораторном занятии.

Студент допускается к последующей работе только с одной незащищенной, но полностью оформленной работой.

Семестровый зачет по лабораторному практикуму может быть выставлен на основании зачетов по всем выполненным работам.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Н.Б. Догадин. Основы радиотехники [Текст]: учебник – С.-Пб.: Изд-во «Лань», 2007 г.
- [2] Л.З. Бобровников. Электроника [Текст]: учебник – С.-Пб.: Изд-во «Питер», 2004 г.
- [3] Е.М. Гершензон, Г.Д. Полянина, Н.В. Соина. Радиотехника [Текст]: учебник – М.: «Просвещение», 1986 г.
- [4] Е.М. Гершензон, Н.Н. Малов, Г.Д. Полянина, В.С. Эткин. Радиотехника [Текст]: учебник – М.: «Просвещение», 1971 г.
- [5] И.П. Жеребцов. Радиотехника [Текст]: учебник – «Связь», изд. 5-е, 1963—1965 гг.
- [6] И.П. Жеребцов. Основы электроники [Текст]: учебник – Л.: «Энергоатомиздат», 1989 г.
- [7] Справочники по электронным электровакуумным и полупроводниковым приборам [Текст] – издания 1963—2016 гг.

I. Электронные лампы

Электронная лампа — управляемый электровакуумный прибор с высоким вакуумом (порядка 10^{-6} — 10^{-7} мм рт. ст.) и термоэлектронным катодом, предназначенный для различного рода преобразований электрических величин. Электронные лампы в радиоэлектронных устройствах используются в качестве выпрямительных, усилительных, частотопреобразовательных, переключающих и др. элементов.

Основной частью электронной лампы является система электродов или разрядная система. В нее входят катод — источник (эмиттер) электронов, анод — приемник (коллектор) электронов и располагающиеся между катодом и анодом сетки — управляющие электроды.

По количеству электродов различают двухэлектродные лампы (диоды), трехэлектродные (триоды), четырехэлектродные (тетроды) и пятиэлектродные (пентоды). Менее распространены гексоды (лампы с четырьмя сетками), гептоды (с пятью сетками) и октоды (лампы, имеющие шесть сеток). Электронные лампы, содержащие две (или более) системы электродов с независимыми потоками электронов, называются комбинированными.

Электронные лампы классифицируются также по мощности, диапазону частот (низкочастотные, высокочастотные, сверхвысокочастотные) и по назначению (усилительные, генераторные, модуляторные, частотопреобразовательные, выпрямительные, измерительные и т. п.).

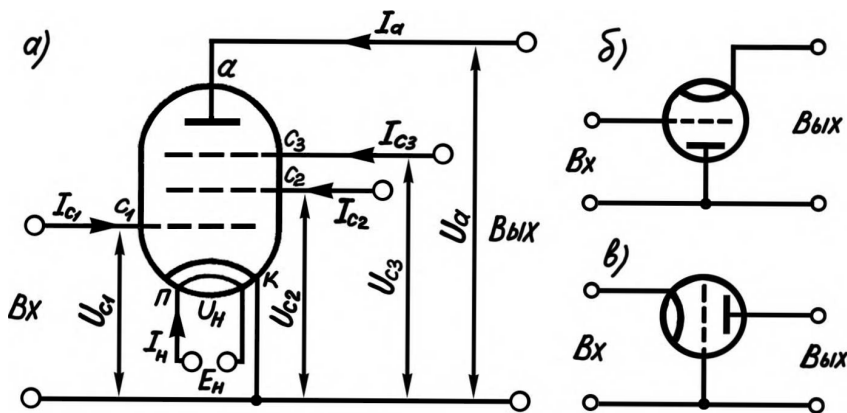


Рис. 1

Схема включения лампы зависит от выполняемых ею функций. Однако во всех схемах один из электродов принимается за общий, а остальные подключаются к нему. На рис. 1а представлено включение пентода в схему с общим катодом и показаны цепи электродов — цепи, соединяющие данный электрод с общим (через лампу). Эти цепи именуются по названию данного электрода. В разрывы цепей включаются источники питания, резисторы, трансформаторы и т. д. Включение триода в схему с общим анодом представлено на рис. 1б, с общей сеткой — на рис. 1в.

Характеристики и параметры электронных ламп

Статические характеристики

Для того, чтобы составить представление о свойствах электронной лампы, определить ее параметры, правильно выбрать режим работы в схеме и рассчитать схему, применяются вольт-амперные характеристики ламп — графики зависимости токов в цепях между электродами от напряжений на электродах. Эти зависимости снимаются экспериментально и для практического использования приводятся в паспортах ламп и справочниках. Характеристики можно

также снимать и наблюдать на экране осциллографа с помощью специальных приборов — характериографов.

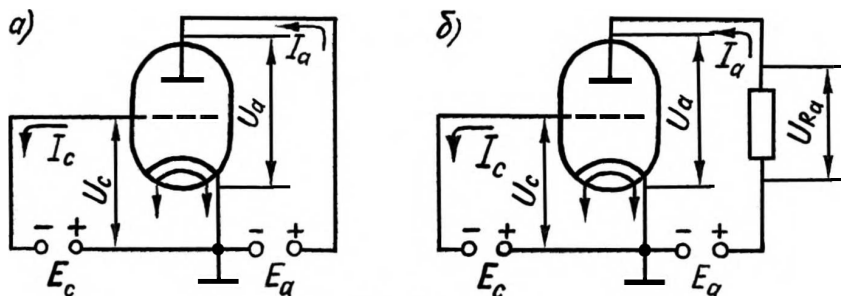


Рис. 2

Характеристики называются статическими, если они сняты при отсутствии нагрузки в анодной цепи лампы, и динамическими — при наличии нагрузочного сопротивления. На рис. 2 показаны схемы включения триода (с общим катодом) в статическом (а) и динамическом (б) режимах.

Наиболее важными и употребительными характеристиками являются:

а) анодно-сеточные

$$I_a = f(U_{c1}) \text{ при } U_a; U_{c2}; U_{c3} = \text{const};$$

б) анодные

$$I_a = f(U_a) \text{ при } U_{c1}; U_{c2}; U_{c3} = \text{const};$$

в) сеточные

$$I_{c1} = f(U_{c1}) \text{ при } U_a; U_{c2}; U_{c3} = \text{const}.$$

У триода практически используются все три указанных вида статических характеристик. Их семейства приведены на рис. 3.

Основными характеристиками экранированных ламп, по которым производится расчет рабочих режимов и определение параметров, являются семейства анодных характеристик $I_a = f(U_a)$. Анодно-сеточные характеристики таких ламп имеют познавательное значение.

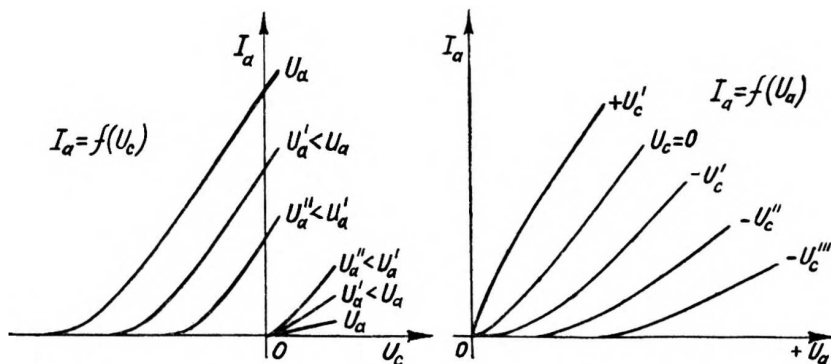


Рис. 3

Так как различные характеристики электронных ламп дают разными способами зависимости одних и тех же величин, то на основании имеющихся, например, анодных характеристик можно построить анодно-сеточные и наоборот.

Экранирующая сетка, на которую подается положительный потенциал относительно катода, значительно изменяет свойства электронных ламп. У тетродов и пентодов, по сравнению с триодами, изменяется токораспределение в лампе, резко возрастает усиление, увеличивается внутреннее сопротивление. Из хода анодно-сеточных характеристик тетрода (или пентода) $I_a = f(U_{c1})$ (рис. 4), снятых при разных напряжениях на аноде и экранирующей сетке, видно, что экранирующая сетка действует на анодный ток сильнее, чем анод.

Статические анодные характеристики $I_a = f(U_a)$ тетрода и пентода приведены на рис. 5. Характерный провал анодных характеристик тетрода объясняется динаatronным эффектом — явлением уменьшения анодного тока I_a и увеличения тока экранной сетки I_{c2} за счет вторичной эмиссии с анода при невысоких напряжениях на аноде.

Этот существенный недостаток тетродов, затрудняющий их практическое использование, устранен в пентодах и лучевых тетродах путем создания между анодом и экранной сеткой пространственного заряда, достаточного для торможения вторичных электронов. В пентодах тормозящее поле создается с помощью дополнительной противодинаatronной (защитной) сетки; в лучевых тетродах подавление динаatronного эффекта обеспечивается специальной конструкцией лампы.

В результате анодные характеристики пентодов и лучевых тетродов не имеют падающих участков.

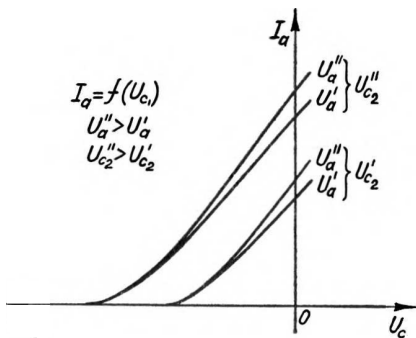


Рис. 4

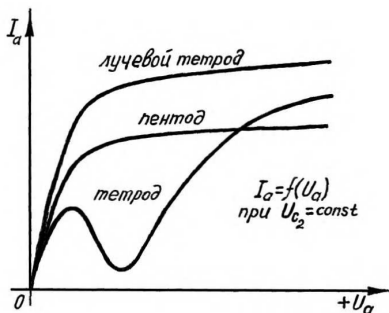


Рис. 5

Динамические характеристики

В статическом режиме напряжение на аноде лампы всегда равно напряжению источника питания, т.е. $U_a = E_a$. В динамическом же режиме это равенство соблюдается только в отсутствии анодного тока, когда лампа заперта. Во всех остальных случаях $I_a > 0$ и $U_a < E_a$ на величину падения напряжения U_{R_a} на сопротивлении нагрузки, т.е. напряжение на аноде равно:

$$U_a = E_a - I_a R_a = E_a - U_{R_a}.$$

Поэтому в динамическом режиме анодный ток будет изменяться не по статической характеристике, а по некоторой более пологой линии — динамической характеристике, учитывающей влияние изменения анодного напряжения. Следовательно, анодный ток лампы в данном случае является функцией двух напряжений:

$$I_a = f(U_{c1}; U_a) \quad \text{при} \quad E_a = \text{const}.$$

Динамические анодно-сеточные характеристики триода, снятые при различных R_a , представлены на рис. 6 а, динамические анодные, построенные также для различных R_a , — на рис. 6 б.

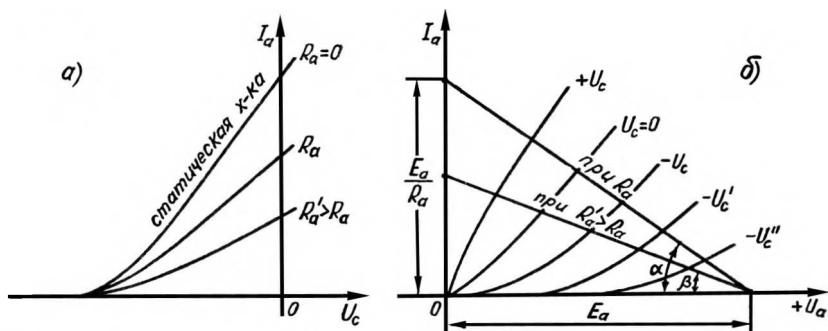


Рис. 6

Анодные динамические характеристики или линии нагрузки для электронных ламп легко строятся в плоскости анодных статических характеристик по двум точкам, в которых они пересекают оси координат: первая точка ($I_a = 0$; $U_a = E_a$), вторая ($I_a = \frac{E_a}{R_a}$; $U_a = 0$). Обе точки соединяются прямой, угол наклона которой к оси абсцисс:

$$\alpha = \arctg \frac{1}{R_a}, \quad \text{т.к.} \quad \tg \alpha = \frac{1}{R_a}.$$

Статические параметры

Кроме характеристик, для оценки и сравнения свойств ламп различных типов, а также для расчета схем пользуются параметрами ламп — некоторыми константами для той или иной области характеристик. Числовые значения параметров определяются соотношением между токами и напряжениями (I_a ; U_a , U_{c1}) в лампе и зависят от ее конструкции.

В справочных данных о лампах приводятся параметры для середины прямолинейного участка характеристики, где они остаются неизменными. На криволинейных участках параметры имеют другие значения.

Основными статическими параметрами, соответствующими статическому режиму, являются:

а) крутизна характеристики

$$S = \frac{\partial I_a}{\partial U_{c1}} (\text{mA/B}) \quad \text{при} \quad U_a; U_{c2}; U_{c3} = \text{const};$$

б) внутреннее сопротивление

$$R_i = \frac{\partial U_a}{\partial I_a} (\kappa Ом) \quad \text{при } U_{c1}; U_{c2}; U_{c3} = const;$$

в) коэффициент усиления

$$\mu = \frac{\partial U_a}{\partial U_{c1}} \quad \text{при } I_a; U_{c2}; U_{c3} = const.$$

Параметры связаны между собой простым соотношением, которое называют внутренним уравнением лампы или формулой Баркгаузена:

$$SR_i = \mu \quad \text{или} \quad SR_i D = 1,$$

где $D = \frac{1}{\mu}$ — проницаемость лампы.

Способов определения параметров S , R_i , μ существует несколько. Простым является графический способ — по экспериментально снятым статическим характеристикам $I_a = f(U_{c1})$ или $I_a = f(U_a)$. Необходимые графические построения для определения параметров триода методом характеристического треугольника показаны на рис. 7.

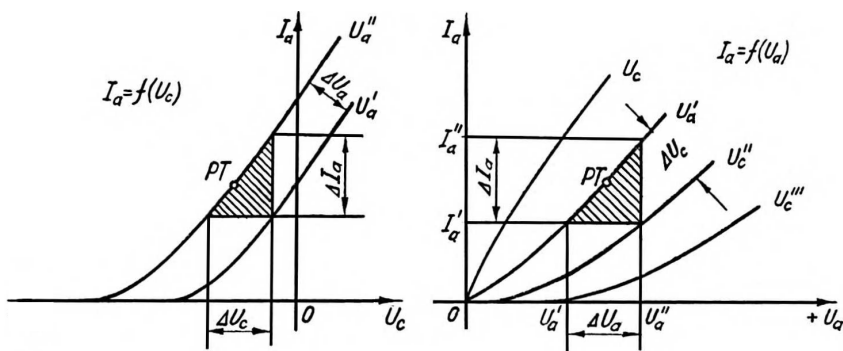


Рис. 7

Вычисление параметров ведется по указанным выше формулам, но вместо частных производных берутся малые конечные изменения токов и напряжений

$$\Delta I_a = I_a'' - I_a'; \quad \Delta U_{c1} = U_{c1}'' - U_{c1}'; \quad \Delta U_a = U_a'' - U_a'.$$

Тогда

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_{c1}} (\text{mA/B}); \quad R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} (\text{кОм}); \quad \mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_{c1}}.$$

Метод характеристического треугольника для тетродов и пентодов неприменим, и их параметры определяются методом двух отсчетов по семейству анодных характеристик (рис. 8). Параметры вычисляются по тем же формулам:

$$S = \frac{\Delta I'_a}{\Delta U_{c1}} (\text{mA/B}), \quad \text{где} \quad \Delta I'_a = I'''_a - I''_a; \quad \Delta U_{c1} = U''_{c1} - U'_{c1};$$

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I''_a} (\text{кОм}), \quad \text{где} \quad \Delta U_a = U''_a - U'_a; \quad \Delta I''_a = I''_a - I'_a; \quad \mu = SR_i.$$

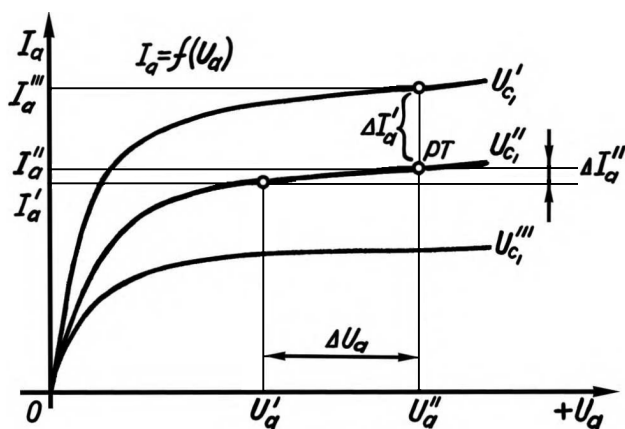


Рис. 8

Удобными и нетрудоемкими являются способы определения параметров без снятия характеристик. К ним относятся принципиально не отличающиеся от описанных выше методы двух и трех отсчетов, а также методы мостовых схем. На основе мостовых схем созданы специальные универсальные приборы — испытатели ламп Л1—2 (ИЛ—14), Л1—3 (МИЛУ) и др., предназначенные для быстрого измерения параметров и оценки степени годности испытываемых радиоламп.

Динамические параметры

Динамические параметры ламп по величине всегда меньше статических. Динамическая крутизна характеристики и динамический коэффициент усиления определяются как расчетным путем, через известные статические параметры по формулам:

$$S_{\partial} = S \frac{R_i}{R_i + R_a}; \quad \mu_{\partial} = \mu \frac{R_a}{R_a + R_i},$$

так и графическим методом по динамическим характеристикам (рис. 9).

$$S_{\partial} = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_{c1}}; \quad \mu_{\partial} = \frac{\Delta U_{R_a}}{\Delta U_{c1}},$$

где $\Delta I_a = I_a'' - I_a'$; $\Delta U_{c1} = U_{c1}'' - U_{c1}'$; $\Delta U_{R_a} = U_a'' - U_a'$.

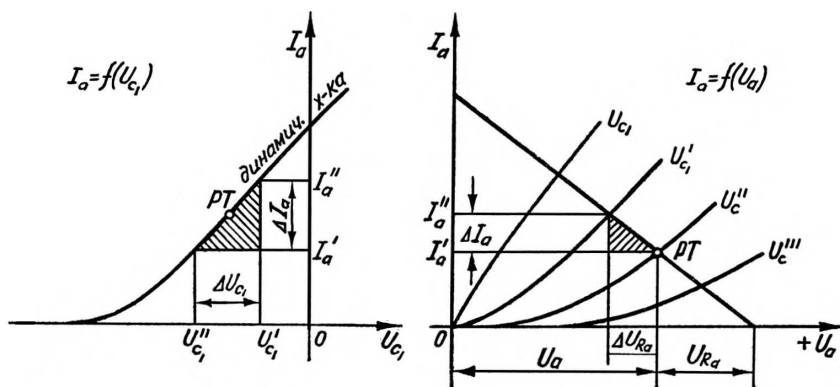


Рис. 9

К параметрам ламп также относятся величины нормальных питающих напряжений, ток эмиссии, срок службы, максимально допустимая мощность потерь на аноде $P_{a \text{ макс}}$, междуэлектродные емкости C_{ac} ; $C_{ск}$; $C_{ак}$ и другие данные.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка для снятия характеристик приемно-усилительных ламп в режиме постоянного тока (рис. 10) смонтирована на вертикальной

панели. Установка позволяет снимать статические и динамические характеристики триодов, тетродов и пентодов пальчиковой и металлической серий.

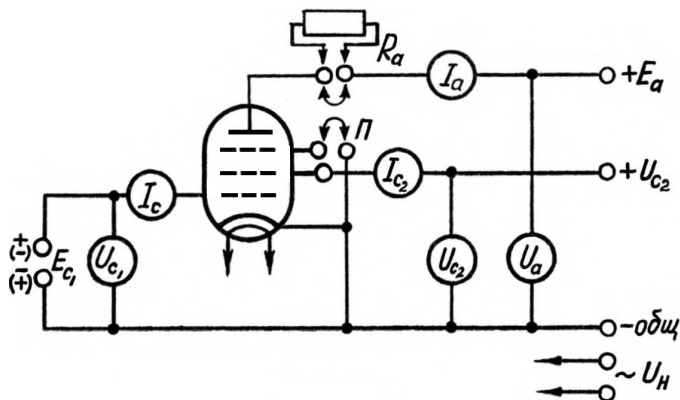


Рис. 10

Установка питается от универсального выпрямителя ВУП-1 или ВУП-2.

Напряжение на управляющую сетку подается с клемм « 0 ± 100 В», изменение величины и полярности осуществляется регулятором выпрямителя.

Анодное напряжение при испытании триода и напряжение экранной сетки (для тетрода и пентода) снимается с клемм « $0 \div 250$ В». Изменение его величины производится также соответствующим регулятором выпрямителя.

Анодное напряжение при испытании тетрода или пентода снимается с клемм «-общ. + 250 В» и регулируется внешним потенциометром (5000 Ом).

Напряжение на электродах и токи в цепях измеряются съемными многопредельными приборами, входящими в комплект к лабораторной панели. Пределы измерения приборов выбираются в соответствии с паспортными данными ламп.

Для исследуемых ламп на установке имеются ламповые панели: октальная и две пальчиковые (семи и девятиштырьковые). Штырьки выведены на нумерованные гнезда, соединяемые коммутирующими проводами со схемой.

Тетродное и пентодное включение пентода осуществляется перемычкой П. Нагрузочные резисторы R_a напаяны на панельки со штырьками для включения в разрыв анодной цепи.

Работа № 1

Триод в статическом режиме

Цель работы — изучение статических характеристики параметров вакуумного триода, снятие характеристик и определение параметров.

Литература: [1]; [2]; [3]; [4]; [6].

I. Оборудование и приборы

1. Лабораторная панель с комплектом измерительных приборов.
2. Универсальный выпрямитель ВУП-1 или ВУП-2.
3. Исследуемый триод.

II. Лабораторное задание

1. Получить у преподавателя задание с указанием типа лампы и исходных данных исследования.
2. Ознакомиться по справочнику с основными электрическими параметрами типовыми характеристиками исследуемого триода.
3. Подготовить установку для снятия статических характеристик триода. Подобрать приборы (из комплекта) для измерения U_a ; I_a ; U_{c1} и I_{c1} . После проверки схемы преподавателем включить установку и произвести ее опробование.
4. Снять семейство статических анодно-сеточных $I_a = f(U_{c1})$ и сеточных $I_{c1} = f(U_{c1})$ характеристик триода при заданных (см. карточку-задание стр.87) значениях U_a .

При измерениях заданные U_a поддерживать неизменными, отсчет произвести не менее чем для десяти значений U_{c1} .

Результаты измерений свести в таблицу 1 и построить характеристики на одном чертеже.

Таблица 1

U_{c1} (В)	При		При		При	
	$U_a = \quad В$		$U_a = \quad В$		$U_a = \quad В$	
	I_a (мА)	I_{c1} (мА)	I_a (мА)	I_{c1} (мА)	I_a (мА)	I_{c1} (мА)

5. Снять семейство статических анодных характеристик триода $I_a = f(U_a)$ при заданных U_{c1} .

По результатам измерений, сведенным в таблицу 2, построить характеристики.

Таблица 2

U_a (В)	$I_a \quad (мА)$		
	при	при	при
	$U_{c1} = \quad В$	$U_{c1} = \quad В$	$U_{c1} = \quad В$

6. По семействам анодно-сеточных (на прямолинейном участке) и анодных характеристик (в одной и той же точке для обоих семейств) определить статические параметры S , R_i , μ .

Результаты расчета и данные справочника (для сравнения) свести в таблицу 3. Проверить, как выполняется внутреннее уравнение лампы.

Таблица 3

Параметр	По справочнику	Результаты расчета	
		по $I_a = f(U_a)$	по $I_a = f(U_{c1})$
S (мА/В)			
R_i (кОм)			
μ			

III. Содержание отчета

1. Паспортные данные и цоколевка исследуемого триода.
2. Принципиальная схема исследования.
3. Таблицы результатов измерений и расчетов к пп. 4, 5, 6 и графики семейств характеристик.

IV. Контрольные вопросы

1. Почему электронные лампы называют нелинейными сопротивлениями?
2. Назвать основные статические характеристики триодов. Для каких целей они используются на практике?
3. Дать определение и объяснить физическую сущность основных статических параметров ламп.
4. Каковы недостатки триода?
5. Возможен ли динаatronный эффект в триоде?
6. Если сетка лампы ни с чем не соединена, то она при работе лампы заряжается до некоторого отрицательного потенциала, как это объяснить?
7. Можно ли по семейству анодно-сеточных характеристик построить анодные характеристики и наоборот?
8. Почему при росте отрицательного напряжения на сетке анодная характеристика триода сдвигается вправо?
9. Как определяются параметры триода по семействам анодно-сеточных и анодных характеристик?

Работа № 2

Триод в динамическом режиме

Цель работы — изучение динамического режима работы триода, динамических характеристик и параметров.

Литература: [1]; [2]; [3]; [4]; [6].

I. Оборудование и приборы

1. Лабораторная панель с комплектом измерительных приборов.
2. Универсальный выпрямитель ВУП-1 или ВУП-2.
3. Нагрузочные резисторы.
4. Исследуемый триод.

II. Лабораторное задание

1. Используется такая же лампа как в предыдущей работе. Ее исходные параметры даны в карточке-задании к работе № 1—2 (стр.87).
2. Подготовить установку для снятия динамических характеристик триода. После проверки схемы преподавателем включить ее, произвести опробование.
3. Снять динамические анодно-сеточные характеристики $I_a = f(U_{c1})$ для заданных R_a и E_a .

Величина E_a устанавливается при $I_a = 0$, напряжение изменяется так же, как и при снятии статических характеристик.

Результаты измерений свести в таблицу 1 и в масштабе, принятом для статических анодно-сеточных характеристик предыдущей работы (п. 4), построить динамические характеристики.

Таблица 1

$E_a =$ В		
U_{c1} (В)	I_a (мА)	I_a (мА)
	при	при
	$R_{a1} =$ кОм	$R_{a2} =$ кОм

- На графике семейства анодных статических характеристик $I_a = f(U_a)$, снятых в предыдущей работе (п. 5), построить теоретические динамические анодные характеристики (линии нагрузки) для заданных R_a и E_a .
- На графике, полученном в результате выполнения п. 3 по данным одной из нагрузочных прямых (п. 4), построить для сравнения участок динамической анодно-сеточной характеристики. Построение выполнить другим цветом.
- В указанной в карточке-задании рабочей точке (точке пересечения анодной динамической характеристики со статической анодной характеристикой) определить графически и расчетным путем динамические параметры S_{∂} и μ_{∂} .
Результаты свести в таблицу 2.

Таблица 2

	S_{∂} (мА/В)	μ_{∂}
Графический метод		
Расчет по формулам		

III. Содержание отчета

- Принципиальная схема исследования.
- Таблицы и построения к пп. 3, 4, 5 и 6.

Семейство анодных статических характеристик, необходимое для выполнения пп. 4, 5 и 6, взять из предыдущей работы.

IV. Контрольные вопросы

1. Чем отличается динамический режим работы лампы от статического режима?
2. Почему с увеличением сопротивления нагрузки уменьшается крутизна динамической анодно-сеточной характеристики?
3. Объяснить порядок построения динамической анодно-сеточной характеристики по нагрузочной прямой.
4. Как на семействе статических анодных характеристик при заданных R_a и E_a вычертить динамическую анодную характеристику?
5. Назвать динамические параметры ламп. Рассказать порядок их определения по данным характеристикам.
6. Привести формулы для расчета динамических параметров через статические.

Работа № 3

Тетрод и пентод

Цель работы — снятие и анализ анодных и анодно-сеточных характеристик тетрода и пентода, изучение влияния динатронного эффекта на работу ламп и определение статических параметров по характеристикам.

Литература: [1]; [2]; [3]; [4]; [6].

I. Оборудование и приборы

1. Лабораторная панель с комплектом измерительных приборов.
2. Универсальный выпрямитель ВУП-1 или ВУП-2.
3. Потенциометр 5000 Ом для регулировки U_a .
4. Исследуемая лампа.

II. Лабораторное задание

1. Получить у преподавателя задание с указанием типа лампы и исходных данных исследования (карточку-задание стр.88).
2. Ознакомиться по справочнику с основными данными и типовыми характеристиками исследуемой лампы.
3. Подготовить установку к работе, после проверки ее преподавателем включить и произвести опробование.
4. Снять характеристики $I_a = f(U_a)$ и $I_{c2} = f(U_a)$ при заданных U_{c1} и U_{c2} (см. карточку-задание) для двух случаев:
 - а) антидинатронная сетка соединена с экранирующей — тетродное включение;
 - б) антидинатронная сетка соединена с катодом — пентодное включение.

При измерениях поддерживать постоянство U_{c1} и U_{c2} в тетродном включении внимательно следить за анодным током в области изгибов кривой, чтобы не пропустить характерных искажений, обусловленных динатронным эффектом.

Результаты измерений свести в таблицу 1 и построить на одном чертеже характеристики $I_a = f(U_a)$; $I_{c2} = f(U_a)$ и $I = f(U_a)$, где $I = I_a + I_{c2}$.

Таблица 1

U_a (В)	Тетрод			Пентод	
	$U_{c1} = \text{В}; U_{c2} = U_{c3} = \text{В};$			$U_{c1} = \text{В}; U_{c2} = \text{В}; U_{c3} = \text{В}$	
	I_a (мА)	I_{c2} (мА)	$I = I_a + I_{c2}$ (мА)	I_a (мА)	I_{c2} (мА)

Объяснить ход характеристик, подтверждают ли они теорию динатронного эффекта. Указать точку максимального проявления динатронного эффекта.

5. Снять семейство статических анодных характеристик $I_a = f(U_a)$ исследуемого пентода при заданных U_{c1} ; U_{c2} и U_{c3} (см. карточку-задание).

Результаты измерений свести в таблицу 2 и построить характеристики.

Таблица 2

$U_{c2} = \quad \text{В}; \quad U_{c3} = \quad \text{В}$			
U_a (В)	$I_a \quad (\text{мА})$		
	при $U_{c1} = \quad \text{В}$	при $U_{c1} = \quad \text{В}$	при $U_{c1} = \quad \text{В}$

6. В заданной рабочей точке определить статические параметры.
7. Для пентода снять семейство анодно-сеточных характеристик $I_a = f(U_{c1})$ при заданных U_a и U_{c2} .

Результаты измерений свести в таблицу 3 и построить характеристики.

Таблица 3

U_{c1} (В)	$I_a \quad (\text{мА})$			
	$U_a = \quad \text{В};$	$U_{c3} = \quad \text{В}$	$U_a = \quad \text{В};$	$U_{c3} = \quad \text{В}$
	при $U_{c2} = \quad \text{В}$	при $U_{c2} = \quad \text{В}$	при $U_{c2} = \quad \text{В}$	при $U_{c2} = \quad \text{В}$

Рассмотреть влияние изменений U_a на ход кривых.

8. По учебнику и справочнику ознакомиться с конструкцией и параметрами лучевого тетрода, указанного в задании.

Привести в отчете рисунок устройства лампы и ее основные параметры.

III. Содержание отчета

1. Паспортные данные и цоколевка исследуемой лампы.
2. Принципиальная схема исследования.
3. Таблицы, характеристики и требуемые построения к пп. 4, 5, 6, 7.
4. Схематичный рисунок конструкции лучевого тетрода и его данные (к п. 8).

IV. Контрольные вопросы

1. Рассказать о развитии многоэлектродной лампы от триода к пентоду. Объяснить причины изменения конструкции и действие каждого добавочного электрода.
2. Почему в тетродах напряжение на экранирующей сетке должно быть меньше, чем на аноде?
3. Почему у пентодов и тетродов коэффициент усиления и внутреннее сопротивление переменному току больше, чем у триодов?
4. Какими путями подавляется вторичная эмиссия в пентодах и лучевых тетродах?
5. Почему анодные характеристики пентодов при любом напряжении на управляющей сетке начинаются в начале координат?
6. Почему появляется провал в анодной характеристике лампы, когда защитная сетка соединена с анодом?
7. Рассказать, как определяются статические параметры тетродов и пентодов по характеристикам.

II. Ионные приборы

Ионным прибором называется электронный прибор, в котором происходит электрический разряд в инертных газах, их смесях, водороде или парах ртути.

Ионные приборы весьма разнообразны и широко применяются наряду с электронными лампами и полупроводниковыми приборами. Они используются во многих устройствах автоматики вычислительной и импульсной техники, в выпрямительных и релаксационных устройствах, для стабилизации напряжения, преобразования электрической энергии в световую и других системах.

Вольтамперная характеристика газового разряда

Вольтамперная характеристика газового разряда (рис. 11) имеет ряд областей, характеризующих несколько различных видов разряда, каждый из которых используется в различных газоразрядных приборах.

Ток на участке *OA* характеристики обусловлен ионизацией газа и эмиссией электронов из катода под действием внешних факторов (свет, тепло, радиация, космическое излучение). С увеличением напряжения на электродах энергия электронов становится достаточной, чтобы при столкновении с атомом газа ионизировать его. Образующиеся при этом положительные ионы, падая на катод, выбивают вторичные электроны — ток возрастает (участок *AB*).

В точке B несамостоятельный разряд переходит в самостоятельный, т.е. он может существовать при отсутствии внешнего ионизатора за счет вторичной эмиссии электронов из катода. Напряжение, при котором возникает самостоятельный разряд, называется напряжением зажигания U_z . На участке BC рост тока сопровождается уменьшением напряжения за счет возникновения пространственного положительного заряда у катода.

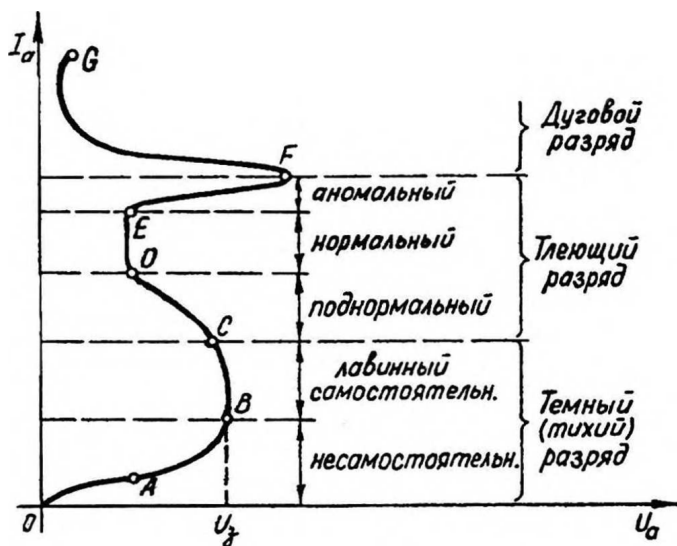


Рис. 11

В точке C лавинный самостоятельный разряд переходит в поднормальный тлеющий, характеризующийся локализацией области разряда и уменьшением рабочей (светящейся) поверхности катода — происходит «шнурование» разряда. Возрастает плотность тока. В точке D она принимает нормальное значение, т.е. такое, при котором напряжение на приборе минимально, при этом разряд носит название нормального тлеющего.

На участке DE возрастание тока вызывает увеличение рабочей поверхности катода при нормальной плотности тока и нормальном напряжении. Величина этого напряжения определяется материалом катода и родом газа. В точке E оказывается использованной вся площадь катода, дальнейшее увеличение тока может происходить только

при возрастании его плотности и, следовательно, требует увеличения напряжения. Разряд на участке EF называется аномальным тлеющим. Протяженность участка DE пропорциональна площади катода. Все формы тлеющего разряда сопровождаются свечением вблизи катода.

Дальнейшее увеличение тока приводит к дополнительной эмиссии с катода (ионная бомбардировка, разогрев и автоэлектронная эмиссия). В результате напряжение на приборе уменьшается, разряд переходит в дуговой (участок FG).

Ионный прибор в зависимости от приложенного напряжения и величины последовательно включенного сопротивления может работать в любом из перечисленных режимов. Однако каждый конкретный прибор рассчитан на работу в определенной области и, во избежание разрушения, защищается от перехода в режим с большим током ограничительным резистором.

Наиболее широкое применение находят ионные приборы, работающие в режимах нормального тлеющего разряда (приборы самостоятельного разряда с ненакаленным катодом) и дугового разряда. К первой группе относятся неоновые лампы, стабилитроны тлеющего разряда, тиратроны с холодным катодом и др. Вторая группа подразделяется на две подгруппы: приборы самостоятельного дугового разряда (игнитроны, экситроны) и приборы несамостоятельного дугового разряда (газотроны и тиратроны с накаленным катодом).

Ионные приборы тлеющего разряда

Газоразрядные стабилитроны

Стабилитроны тлеющего разряда — неуправляемые газоразрядные диоды, предназначенные для поддержания неизменным выходного напряжения на нагрузке при изменении нагрузочного тока или напряжения в питающей сети.

Стабилитрон состоит (рис. 12) из цилиндрического катода K , внутри которого находится стержневидный анод A . Электроды помещены в стеклянный баллон, заполненный смесью инертных газов при давлении порядка нескольких десятков миллиметров ртутного столба. Для облегчения зажигания к внутренней стороне катода приварен поджигающий электрод P .

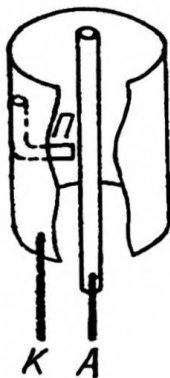


Рис. 12

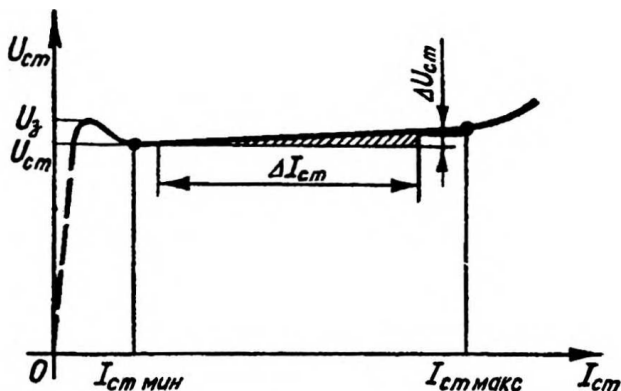


Рис. 13

Вольт-амперная характеристика стабилитрона $U_{ст} = f(I_{ст})$ — зависимость напряжения горения от величины тока, проходящего через прибор (рис. 13). Вольт-амперная характеристика имеет почти горизонтальный участок. На нем падение напряжения остается приблизительно постоянным, рост тока сопровождается увеличением рабочей (светящейся) поверхности катода.

По вольт-амперной характеристике определяются основные параметры стабилитрона: напряжение зажигания $U_з$, величина стабилизированного напряжения (напряжение горения) $U_{ст}$, минимальное и максимальное значение тока через стабилитрон $I_{ст мин}$ и $I_{ст макс}$, внутреннее сопротивление

$$R_i = \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}}.$$

В схеме стабилизации напряжения (рис. 14) стабилитрон включается параллельно нагрузке R_n , на которой должно быть стабильное напряжение $U_{ст}$. Источник стабилизируемого напряжения U подключается к стабилитрону через балластное ограничительное сопротивление — резистор R_δ .

Изменение напряжения U приводит к изменению тока через стабилитрон $I_{ст}$ и падения напряжения на R_δ , а напряжение $U_{ст}$ на электродах остается практически постоянным

$$U_{ст} = U - U_{R_\delta}.$$

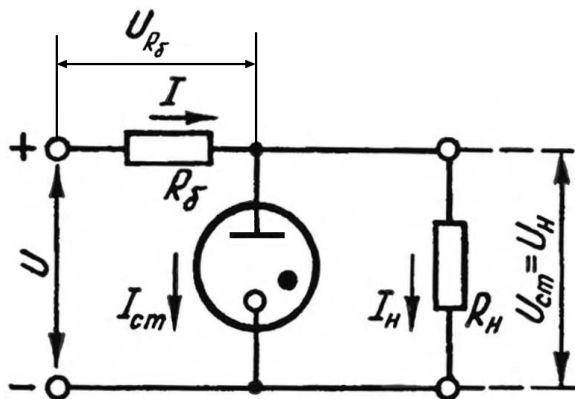


Рис. 14

Уменьшение или увеличение сопротивления R_H изменяет распределение тока между нагрузкой и стабилитроном.

$$I = I_{ст} + I_H.$$

Величина балластного резистора рассчитывается по формуле:

$$R_6 = \frac{U - U_{ст}}{I_{ст\text{ ср}} + I_H},$$

где U — напряжение источника,
 $U_{ст}$ — стабилизированное напряжение,

$$I_{ст\text{ ср}} = \frac{I_{ст\text{ макс}} + I_{ст\text{ мин}}}{2} \approx \frac{I_{ст\text{ макс}}}{2},$$

$$I_H = \frac{U_{ст}}{R_H} \text{ — ток нагрузки при } R_H = const \text{ или}$$

$$I_H = I_{H\text{ ср}} = \frac{I_{H\text{ макс}} + I_{H\text{ мин}}}{2} \text{ при } R_H \neq const.$$

Величины $U_{ст}$, $I_{ст\text{ макс}}$ и $I_{ст\text{ мин}}$ приводятся в паспортных данных стабилизатора.

Мощность, рассеиваемая на резисторе R_6

$$P_{R_6} = \frac{(U - U_{ст})^2}{R_6}.$$

Рабочими (внешними) характеристиками стабилитрона в схеме стабилизации называются зависимости:

$$U_{\text{ст}} = U_{\text{н}} = f(I_{\text{н}}) \quad \text{и} \quad I_{\text{ст}} = f(I_{\text{н}}),$$

где $I_{\text{н}}$ — ток нагрузки и
 $U_{\text{н}}$ — напряжение на нагрузке.

Эти характеристики хорошо иллюстрируют принцип работы стабилитрона в схеме и характеризуют качество ее работы.

Тиратроны с холодным катодом

Тиратроны тлеющего разряда являются безнакальными маломощными управляемыми ионными приборами с холодным катодом. Во второй половине XX века они использовались в схемах электрорадиоавтоматики, импульсной технике, ЭВМ, релаксационных генераторах и других устройствах. Сейчас используются редко, так как существуют аналогичные по параметрам полупроводниковые устройства.

Тиратрон — это своеобразное высокочувствительное реле, которое можно включить (зажечь), но нельзя выключить, не снимая напряжения с анода. Особенности конструкции, параметры и характеристики определяют следующие достоинства безнакальных тиратронов: высокую экономичность, простоту конструкции, малые габариты и вес; долговечность и малые пусковые токи при большом входном сопротивлении.

Холодный тиратрон представляет собой стеклянный малогабаритный баллон, наполненный одним или смесью инертных газов под низким давлением ($20 \div 30$ мм рт. ст.). В баллоне находятся: анод—молибденовый стержень, выступающий на 1–2 мм из стеклянной трубки, цилиндрический катод и один или два управляющих электрода (сетки), имеющих форму диска с центральным отверстием и расположенных между анодом и катодом. Один управляющий электрод имеет тиратроны с токовым управлением (рис. 15), два — с электростатическим.

При зажигании разряда сетка—катод в промежутке анод—катод образуется плазма, количество ионов и электронов которой пропорционально току сетки $I_{\text{с}}$. Изменение количества положительных ионов ведет к изменению напряжения зажигания $U_{\text{з}}$ разряда анод—катод.

Следовательно, изменением тока сетки I_c можно управлять зажиганием разряда анод–катод (токовое управление). Это свойство тиратрона позволяет рассматривать его как усилительный элемент по току и мощности.

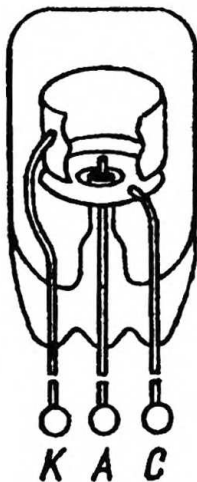


Рис. 15

Основными характеристиками холодного тиратрона являются:

1. вольтамперная характеристика $U_a = f(I_a)$ (рис. 16). Она имеет линейный участок большой протяженности, почти параллельный оси абсцисс, что характерно для приборов тлеющего разряда;
2. пусковая характеристика $U_{аз} = f(I_c)$ или характеристика зажигания (рис. 17) — зависимость, отражающая условия возникновения основного разряда в промежутке анод–катод.

Основные параметры тиратрона с холодным катодом:

1. диапазон токов $I_{a \text{ мин}} \div I_{a \text{ макс}}$, в пределах которого сохраняется нормальный тлеющий разряд, т.е. тиратрон устойчиво работает;
2. напряжение зажигания $U_{аз}$ — минимальное напряжение на аноде, при котором тиратрон зажигается;

3. напряжение горения $U_{аг}$ — напряжение на аноде при нормальном тлеющем разряде и номинальном токе I_a .

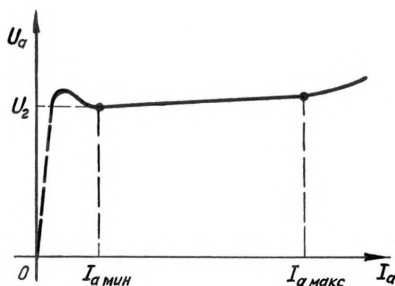


Рис. 16

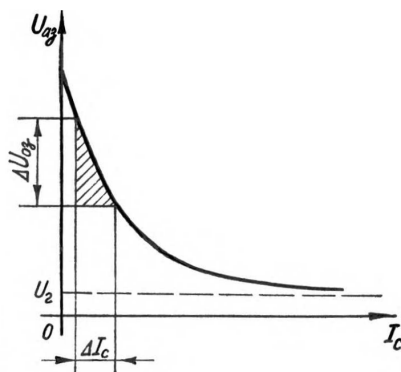


Рис. 17

В пределах $I_{a \text{ мин}} \div I_{a \text{ макс}}$ напряжение горения практически не изменяется;

4. коэффициент усиления по току

$$K_i = \frac{I_a}{I_c},$$

5. коэффициент усиления по мощности

$$K_p = \frac{I_a^2 R_a}{I_c U_c},$$

где I_a — анодный ток;
 R_a — резистор анодной нагрузки
 (сопротивление, ограничивающее ток);
 I_c — ток сетки (пусковой ток);
 U_c — напряжение на сетке;

6. чувствительность тиратрона

$$h = \frac{dU_{a3}}{dI_c} \approx \frac{\Delta U_{a3}}{\Delta I_c}.$$

Величины ΔU_{a3} и ΔI_c определяются по пусковой характеристике.

Тиратроны дугового разряда с накалившимся катодом

Тиратрон с накалившимся катодом — газоразрядный управляемый прибор с несамостоятельным дуговым разрядом в инертных газах или парах ртути. Тиратроны используются в управляемых выпрямителях, в переключающих и релейных устройствах, в схемах релаксационных генераторов и т.д.

Благодаря накалившему катоду, обеспечивающему сравнительно большой поток электронов к аноду, такие тиратроны, минуя режимы темного и тлеющего разрядов, переходят сразу в рабочий режим дугового разряда.

Устройство маломощного тиратрона аналогично устройству вакуумного триода, но физические процессы в тиратроне и его действие отличаются от работы электронных ламп. В вакуумном триоде при помощи сетки можно плавно изменять величину анодного тока, а в тиратроне сетка может управлять только зажиганием разряда (возникновением тока), после чего изменение ее потенциала не влияет на величину анодного тока. Сетка теряет управляющее действие, что отчетливо видно из хода анодно-сеточной характеристики тиратрона $I_A = f(U_c)$ при $U_a = \text{const}$ (рис. 18, кривая 2).

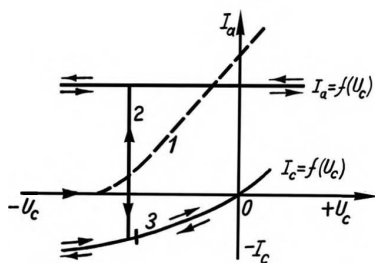


Рис. 18

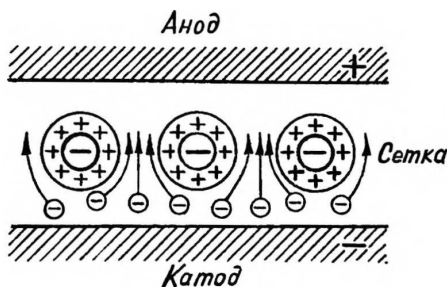


Рис. 19

Такое действие сетки объясняется образованием вокруг сетки «чехла» из положительных ионов, экранирующего сетку и нейтрализующего действие ее отрицательного заряда на электроны, движущиеся к аноду (рис. 19). В цепи сетки появляется сеточный ток, величина

на которого зависит от приложенного к сетке напряжения. Сеточная характеристика $I_c = f(U_c)$ при $U_a = \text{const}$ приведена на рис. 18 (кривая 3). Восстановление управляющих свойств сетки происходит после снижения напряжения анода ниже напряжения горения $U_{\text{ог}}$ (погасания тиратрона).

Основной характеристикой тиратрона, по которой определяется пригодность тиратрона для использования в той или иной схеме, является пусковая характеристика (характеристика зажигания) $U_{\text{аз}} = f(U_c)$ (рис. 20). Положение пусковой характеристики может меняться в зависимости от температуры окружающей среды и других факторов. Поэтому в справочниках приводят пусковую область—зону возможных режимов зажигания (рис. 21).

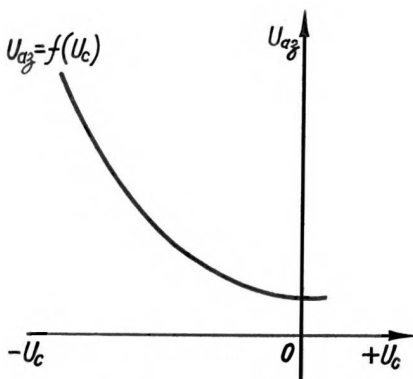


Рис. 20

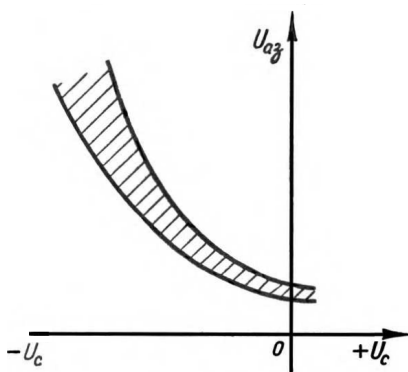


Рис. 21

Работа № 4

Стабилитрон тлеющего разряда

Цель работы — изучение стабилитрона тлеющего разряда, физических основ его действия, конструкции, характеристик и параметров.

Литература: [4]; [5]; [6].

I. Схема исследования

Для снятия характеристик стабилитронов применяется схема, приведенная на рис. 22. Пределы измерения приборов указаны для низковольтных стабилитронов непосредственной стабилизации постоянного напряжения.

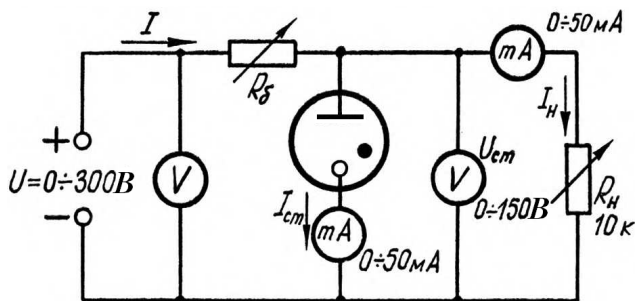


Рис. 22

II. Оборудование и приборы

1. Лабораторная панель.
2. Лабораторный выпрямитель УИП-1 или ВУП-2.
3. Вольтметры постоянного тока (М45М) – 2 шт.
4. Миллиамперметры постоянного тока (АВО-5М) – 2 шт.
5. Исследуемый стабилитрон

III. Лабораторное задание

1. Получить у преподавателя задание с указанием типа стабилитрона и исходных данных исследования.
2. Ознакомиться по справочнику с основными электрическими данными заданного стабилитрона.
3. Собрать схему исследования и предъявить ее на проверку преподавателю.

4. Снять вольтамперную характеристику $U_{\text{ст}} = f(I_{\text{ст}})$ исследуемого стабилитрона.

Характеристика снимается при отключенной нагрузке, последовательно со стабилитроном включается сопротивление R_6 (см. карточку-задание стр.89), наибольший ток стабилитрона не должен превышать величины $I_{\text{ст макс}}$. Ток через стабилитрон $I_{\text{ст}}$ регулировать путем изменения подводимого напряжения. Начальный участок характеристики снимается особо тщательно.

Результаты измерений свести в таблицу 1, построить характеристику.

5. На основании данных исследуемого стабилитрона и заданных величин (см. карточку-задание) U , $I_{\text{н мин}}$, $I_{\text{н макс}}$ рассчитать R_6 и P_{R_6} . Включить R_6 в схему.

6. В схеме стабилизации напряжения при неизменной нагрузке $R_{\text{н}}$ снять зависимость выходного напряжения от подводимого $U_{\text{ст}} = f(U)$.

Результаты измерений свести в таблицу 2, по данным которой построить характеристику.

7. В схеме стабилизации напряжения снять рабочие характеристики:

$U_{\text{ст}} = f(I_{\text{н}})$ — зависимость выходного напряжения от тока нагрузки и $I_{\text{ст}} = f(I_{\text{н}})$ — зависимость тока через стабилитрон от тока нагрузки.

Для снятия характеристик следует при наибольшей величине сопротивления нагрузки $R_{\text{н}}$ создать в лампе разряд, подав входное напряжение U . Поддерживая U неизменным, уменьшать сопротивление $R_{\text{н}}$, тем самым изменять $I_{\text{н}}$ до погасания стабилитрона.

Результаты свести в таблицу 3, по данным которой на одном графике построить зависимости

$$U_{\text{ст}} = f(I_{\text{н}}), \quad I_{\text{ст}} = f(I_{\text{н}}) \quad \text{и} \quad I = I_{\text{ст}} + I_{\text{н}} = f(I_{\text{н}}).$$

Таблица 3

I_H (мА)	$I_{ст}$ (мА)	$U_{ст}$ (В)	I (мА)

IV. Содержание отчета

1. Паспортные данные и цоколевка исследуемого стабилитрона.
2. Схема исследования.
3. Таблицы измерений и графики снятых зависимостей (к пп. 4, 6, 7), расчет R_6 и $P_{кб}$ к п. 5.

V. Контрольные вопросы

1. Кратко охарактеризовать виды тлеющего разряда, указать, какой из них используется в стабилитронах и почему.
2. Почему при электрическом разряде в газе наблюдается свечение?
3. Какой электрод стабилитрона имеет большую поверхность и почему?
4. Объяснить, почему при изменении тока через стабилитрон напряжение на нем остается почти постоянным.
5. Почему стабилитрон в схеме стабилизации напряжения не может работать без балластного сопротивления?
6. Выбрать по справочнику стабилитрон, обеспечивающий стабилизацию напряжения при изменении напряжения источника питания от 100 до 200 В. Рассчитать R_6 для $I_H = 20$ мА.

Работа № 5

Тиратрон тлеющего разряда с холодным катодом

Цель работы — изучение устройства, физических основ действия, характеристик и основных параметров тиратрона тлеющего разряда с токовым управлением.

Литература: [4]; [5]; [6].

I. Схема исследования

Схема исследования представлена на рис. 23. На схеме приведены величины питающих напряжений, данные деталей и пределы измерений приборов для испытания холодного тиратрона МТХ-90.

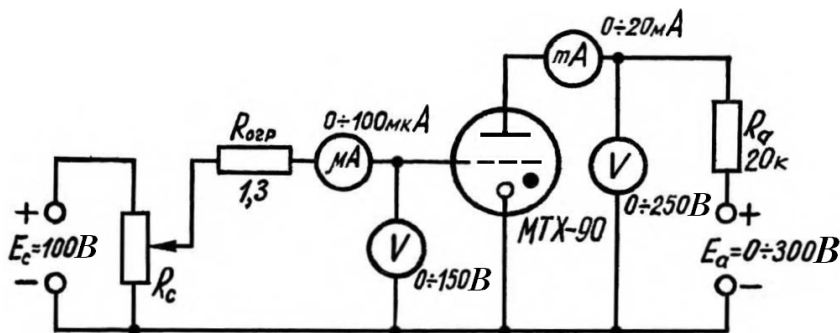


Рис. 23

II. Оборудование и приборы

1. Лабораторная панель.
2. Лабораторный выпрямитель УИП-1 или ВУП-2.
3. Вольтметр постоянного тока (0 ÷ 250 В).
4. Миллиамперметр (0 ÷ 20 мА).

5. Микроамперметр ($0 \div 100$ мкА).
6. Ламповый вольтметр В7-2 (ВЛУ-2).
7. Тиратрон с холодным катодом.

III. Лабораторное задание

1. Получить у преподавателя задание с указанием типа исследуемого прибора и исходных данных.
2. Ознакомиться по справочнику с основными электрическими параметрами исследуемого прибора.
3. Собрать схему установки и после проверки преподавателем произвести ее опробование. Для этого:
 - а) включить источник анодного питания и, плавно увеличивая напряжение U_a , добиться зажигания тиратрона, не допуская при этом превышения $I_{a \text{ макс}}$;
 - б) погасив тиратрон, установить в цепи сетки небольшой пусковой ток I_c (см. карточку-задание стр.91). Убедиться, что с помощью переменного резистора R_c можно изменять I_c в заданных пределах.

4. Снять вольтамперную характеристику $U_a = f(I_a)$ при $U_c = 0$ В. Порядок снятия: зажечь тиратрон, установить заданный I_a (см. карточку-задание стр.91), уменьшая его до нуля, фиксировать U_a .

Результаты измерений свести в таблицу 1, по данным которой построить график.

5. Снять пусковую характеристику $U_{a3} = f(I_c)$. Измерения произвести для значений I_c , указанных в карточке-задании.

Определение напряжения зажигания U_{a3} при заданном I_c производится следующим образом: установить $U_a = 0$, установить I_c , затем увеличивать U_a до напряжения U_{a3} , при котором тиратрон зажигается. Значение $U_a = U_{a3}$ фиксировать.

Результаты измерений свести в таблицу 2, по данным которой построить характеристику.

- Определить коэффициент усиления тиратрона по току K_i и мощности K_p на пологом, переходном и крутом участках пусковой характеристики при заданных пусковых токах I_c и сопротивлении нагрузки R_a .

Требуемые для расчета величины U_c и I_a измерять в схеме, придерживаясь следующего порядка: установить $U_a = 0$, установить заданное I_c и измерить U_c . Затем, увеличивая U_a , зажечь тиратрон и, не меняя подводимого напряжения, замерить I_a .

Данные измерений и результаты расчета свести в таблицу 3.

Таблица 3

№№ п/п	I_c (мкА)	U_c (В)	I_a (мА)	K_i	K_p

- По вольтамперной характеристике определить потенциал горения $U_{аг}$ и диапазон токов $I_{а\text{ мин}} \div I_{а\text{ макс}}$, в пределах которого в тиратроне сохраняется устойчивый нормальный тлеющий разряд.
- По пусковой характеристике определить чувствительность h тиратрона на крутом и пологом участках.

IV. Содержание отчета

- Паспортные данные и цоколевка исследуемого тиратрона.
- Схема исследования.
- Таблицы с результатами измерений и расчетов, требуемые графики (пп. 4, 5, 6), результаты выполнения пп. 7 и 8.

V. Контрольные вопросы

- Кратко охарактеризовать сущность нормального разряда.
- Назвать основные электрические параметры тиратронов с токовым управлением.

3. Перечислить достоинства и недостатки тиратронов с холодным катодом.
4. Каково назначение резисторов $R_{огр}$ и R_a в схеме исследования тиратрона МТХ-90?
5. Почему измерение напряжения на сетке (поджигающем электроде) следует производить ламповым вольтметром?
6. Почему при уменьшении анодного тока менее 1 мА напряжение на тиратроне начинает увеличиваться?
7. Почему зажигание разряда сетка—катод снижает напряжение зажигания разряда анод—катод?
8. Объяснить различие в действии сетки электронных ламп и сетки тиратрона.
9. Написать выражение K_p , не используя в нем R_a , заменив его величинами, которые можно получить путем измерений.
10. Рассчитать I_a по известному I_c , пользуясь полученными пусковой и вольтамперной характеристиками при $R_a = 10\text{ к}$ и $R_a = 40\text{ к}$.

Работа № 6

Тиратрон дугового разряда с накалимым катодом

Цель работы— изучение устройства, физических основ действия, характеристик и основных параметров тиратрона дугового разряда с газовым наполнением.

Литература: [4]; [5]; [6]; [7].

1. Схема исследования

Схема исследования тиратрона показана на рис. 24. Величины питающих напряжений, данные ограничительных резисторов R_a и R_c , потенциометра P и пределы измерений приборов указаны для мало-мощных тиратронов с газовым наполнением.

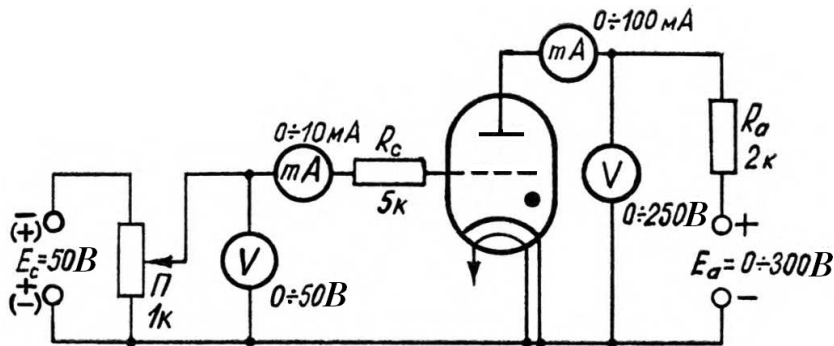


Рис. 24

II. Оборудование и приборы

1. Лабораторная панель.
2. Универсальный источник питания УИП-1 или ВУП-2.
3. Ламповый вольтметр В7-2 (ВЛУ-2).
4. Вольтметр постоянного тока ($0 \div 300$ В).
5. Миллиамперметр ($0 \div 100$ мА).
6. Миллиамперметр ($0 \div 10$ мА).
7. Исследуемый тиратрон.

III. Лабораторное задание

1. Получить у преподавателя задание с указанием типа тиратрона и исходных данных исследования.
2. Ознакомиться по справочнику с основными электрическими данными тиратрона.
3. Собрать схему исследования и предъявить ее на проверку преподавателю.

4. Снять пусковую характеристику (характеристику зажигания)
 $U_{a3} = f(U_c)$.

Порядок снятия характеристики: подавая на сетку постоянное фиксированное напряжение U_c в указанных (см. карточку-задание стр. 90) пределах, при каждом значении U_c постепенно увеличивать напряжение на аноде от нуля до значения $U_a = U_{a3}$, при котором тиратрон зажигается. U_{a3} фиксировать в момент зажигания тиратрона по броскам стрелок приборов.

Результаты измерений свести в таблицу 1, по данным которой построить характеристику.

5. Снять анодно-сеточные $I_a = f(U_c)$ и сеточные $I_c = f(U_c)$ характеристики для заданных значений U_a .

Анодно-сеточная и сеточная характеристики снимаются одновременно. При установленном U_a следует изменять напряжение на сетке U_c (уменьшать отрицательный потенциал) от указанного в карточке-задании значения до момента зажигания тиратрона. Величины U_c , I_a и I_c при этом фиксировать. Затем, после зажигания, продолжать изменение U_c как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения (также замеряя U_c , I_a , I_c) и убедиться, что I_a остается постоянным, а I_c изменяется.

Для уменьшения анодного тока до нуля следует снимать анодное напряжение.

Результаты измерений свести в таблицу 2 и построить характеристики.

IV. Содержание отчета

1. Паспортные данные и цоколевка исследуемого тиратрона.
2. Схема исследования.
3. Таблицы с результатами измерений и характеристики (к пп. 4 и 5).

V. Контрольные вопросы

1. Какой вид газового разряда происходит в тиратроне с накалимым катодом?
2. Назвать основные области применения тиратронов.
3. Почему ионные приборы с дуговым разрядом имеют очень малое внутреннее сопротивление?
4. Почему после зажигания тиратрона его сетка теряет управляющее действие?
5. Какая характеристика называется пусковой и какие причины приводят к появлению пусковой области?
6. Указать порядок включения тиратронов, наполненных парами ртути и инертными газами, и последствия, вызываемые нарушением этого порядка включения.
7. Почему тиратрон не может работать без ограничительных сопротивлений в анодной и сеточной цепях?
8. Объяснить отличие характеристик тиратрона от характеристик вакуумного триода.

III. Полупроводниковые приборы

Полупроводниковыми приборами называются электронные приборы, действие которых основано на явлениях изменения проводимости полупроводниковых материалов от воздействия внешних факторов (температуры, света, радиации, электрических полей).

Ряд преимуществ, присущих этим приборам (малые габариты и вес, долговечность, высокая механическая прочность, малое потребление энергии от источников питания и др.), привел к бурному развитию полупроводниковой электроники. Разработано большое количество полупроводниковых приборов разнообразного назначения, работающих в широком диапазоне частот, мощностей, токов и напряжений и, в том числе, выполняющих те же функции, что и электровакуумные приборы. Перспективные полупроводниковые приборы успешно конкурируют с электровакуумными приборами и зачастую вытесняют их.

Вместе с этим, полупроводниковым приборам присущи и некоторые недостатки: разброс параметров, нестабильность свойств и режима работы в зависимости от внешних факторов, ограниченность для работы на СВЧ и др., что снижает отмеченный выше выигрыш. В одних случаях целесообразнее использовать полупроводниковые приборы, в других — лучше работают электровакуумные приборы.

Наиболее широко применяются полупроводниковые диоды и полупроводниковые триоды — транзисторы.

Проводимость полупроводников

Согласно зонной теории строения вещества, в проводниках валентная зона и зона проводимости перекрываются (см. диаграмму энергетических уровней электронов, рис. 25-а). Поэтому в них всегда имеются электроны проводимости. В изоляторах зона проводимости отделена от валентной широкой ($10 \div 20$ эВ) запрещенной зоной (рис. 25-в), и электрон обычно не может попасть в зону проводимости. Полупроводники также имеют запрещенную зону (рис. 25-б), но ее ширина невелика ($0,5 \div 2$ эВ). В этом случае электрон, получив сравнительно небольшую энергию, вследствие теплового движения, может перейти в зону проводимости, а в валентной зоне появляется дырка. Такой процесс называется тепловой генерацией носителей. Это явление обуславливает возникновение электронного и дырочного тока в полупроводнике при наличии внешнего электрического поля.

Проводимость чистого (без примесей) полупроводника называется собственной. При обычных условиях она очень мала, но с повышением температуры и при освещении полупроводника она резко возрастает. Это свойство лежит в основе работы полупроводниковых терморезисторов и фоторезисторов.

Проводимость полупроводника, содержащего примеси, называют примесной проводимостью. Она бывает двух видов — электронная и дырочная.

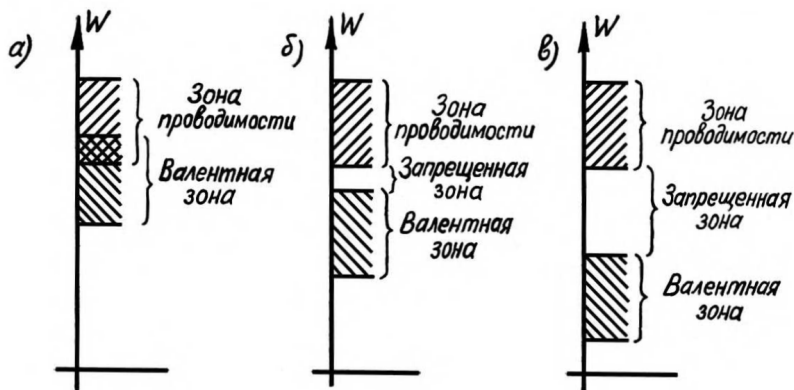


Рис. 25

Электронную проводимость имеют полупроводниковые материалы с донорными примесями, валентность которых превышает валентность самого полупроводника. Электроны проводимости появляются в них в результате перехода электрона из валентной зоны донора в зону проводимости полупроводника. Это объясняется перекрытием валентной зоны донора и зоны проводимости полупроводника (рис. 26).

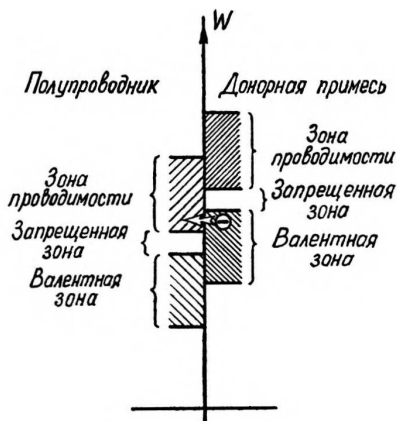


Рис. 26

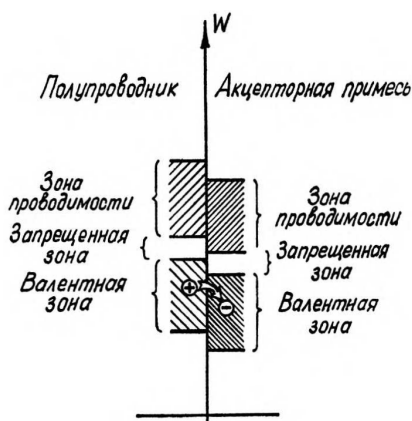


Рис. 27

Дырочная проводимость получается при добавлении акцепторных примесей, с валентностью меньшей, чем у полупроводника. В этом случае (рис. 27) электрон из валентной зоны полупроводника переходит в валентную зону акцептора (на более-низкий энергетический уровень), а в валентной зоне полупроводника образуется вакантное место, условно названное дыркой. Движение дырок можно рассматривать как движение положительно заряженных частиц. Дырка заполняется электроном из валентной зоны соседнего атома, в которой также возникает дырка, и т.д. В результате при действии внешнего электрического поля появляется электрический ток.

Полупроводники с электронной (основные носители — электроны) проводимостью называют полупроводниками типа n (negative), а с дырочной (основные носители — дырки) типа p (positive).

Следует отметить, что в n -полупроводниках существует небольшое количество дырок, а в p -полупроводниках — небольшое количе-

ство электронов. Эти носители называются неосновными и возникают из-за наличия тепловой генерации (как в собственных полупроводниках).

p - n переход

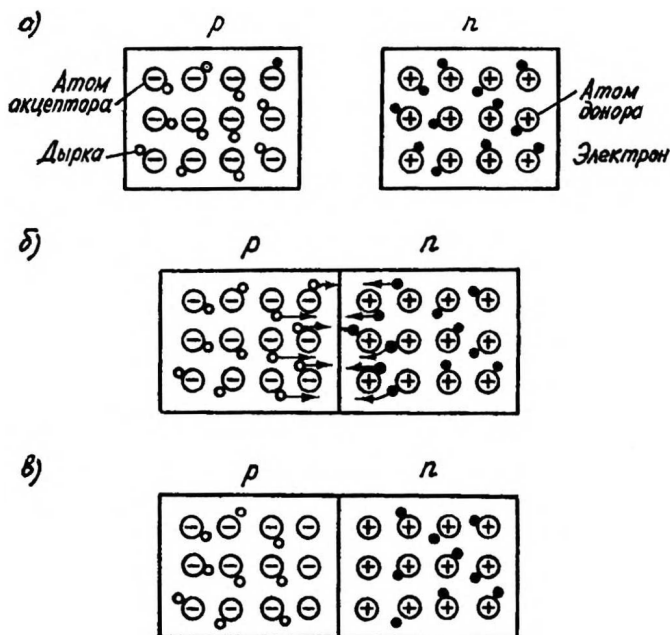


Рис. 28

Контакт двух полупроводников с разной проводимостью (p - и n -типа) называется электронно-дырочным или p - n -переходом. Он имеет несимметричную проводимость, т.е. обладает вентильными свойствами. Это объясняется диффузией основных носителей — дырок из p -области в n -область, а электронов из n -области в p -область. При этом в пограничном слое происходит их рекомбинация. В результате в n -области образуется объемный положительный, а в p -области — объемный отрицательный заряды. Электрическое поле этих зарядов препятствует дальнейшей диффузии основных носителей и способ-

ствуется дрейфу неосновных носителей (Дрейф — движение под действием внешних сил). Таким образом, двойной электрический слой из положительных и отрицательных ионов приводит к возникновению потенциального барьера. Образование потенциального барьера иллюстрируется (рис. 28) (а — полупроводники до соприкосновения, б — в момент соприкосновения, в — после установления динамического равновесия $I_{\text{дифф}} = I_{\text{дрейф}}$).

Если к *p-n*-переходу приложить внешнее напряжение минусом к *p*-области, а плюсом — к *n*-области, то потенциальный барьер увеличился (рис. 29). В этом случае сопротивление перехода велико, ток через него мал. Этот ток обусловлен движением неосновных носителей заряда — дырок в *n*-области и электронов в *p*-области. Такое направление тока называется обратным.

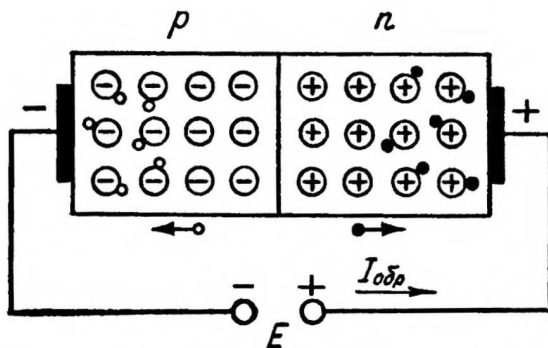


Рис. 29

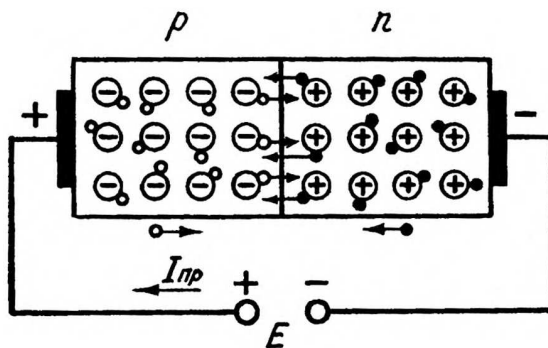


Рис. 30

При противоположной полярности внешнего напряжения потенциальный барьер уменьшается. И если приложенное напряжение больше потенциального барьера, электроны в n -области и дырки в p -области будут перемещаться навстречу друг другу (рис. 30). Сопротивление p – n -перехода резко снижается, и через него проходит большой ток. Это направление тока называется прямым.

Полупроводниковые диоды

Общие сведения

Электронные приборы с одним p – n -переходом называются полупроводниковыми диодами и в зависимости от площади контакта p - и n -полупроводников делятся на точечные и плоскостные.

Точечные диоды применяются для детектирования, преобразования частоты, выпрямления и измерений в области высоких и сверхвысоких частот. Из-за малой площади контакта прямой ток таких диодов невелик (до 30 мА), и они обладают малой междуэлектродной емкостью ($0,25 \div 1$ пФ).

Плоскостные диоды применяются главным образом для выпрямления переменного тока промышленной частоты в блоках питания различных устройств. Они позволяют выпрямлять токи значительной мощности, но имеют большую собственную емкость (десятки пФ и более).

Для изготовления диодов применяются различные полупроводниковые материалы. Наиболее распространены германиевые и кремниевые диоды.

К плоскостным диодам относятся и опорные диоды (кремниевые стабилитроны), которые используются для стабилизации и получения эталонного (опорного) напряжения в электронных устройствах. Опорные диоды работают в режиме электрического пробоя. К их электродам в непроводящем направлении прикладывается напряжение, величина которого достаточна для перевода валентных электронов в зону проводимости. При этом обратный ток $I_{обр}$ резко возрастает. Если рассеиваемая на диоде мощность P не превышает предельно допустимую $P_{\max}$, электрический пробой не переходит в тепловой и p – n -переход не разрушается. Работа опорных диодов в режиме

электрического пробоя характерна малым изменением напряжения на приборе при значительном изменении тока.

Для изготовления опорных диодов используется полупроводник с широкой запрещенной зоной (кремний) и большим содержанием примеси.

Вольтамперные характеристики

Вольтамперная характеристика полупроводникового диода — зависимость тока через диод от приложенного напряжения $I = f(U)$.

Аналитическое выражение идеальной вольтамперной характеристики имеет вид:

$$I = I_{\text{обр}} \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right),$$

где $I_{\text{обр}}$ — обратный ток диода,
 q — заряд электрона,
 k — постоянная Больцмана,
 T — температура окружающей среды в $^{\circ}\text{K}$,
 U — напряжение, приложенное к диоду.

Реальная вольтамперная характеристика (рис. 31) отличается от идеальной — прямой ток $I_{\text{пр}}$ меньше, а обратный ток $I_{\text{обр}}$ больше теоретического. Это объясняется в основном влиянием посторонних примесей в полупроводнике и его неоднородностью. До некоторого предельного значения обратного напряжения $U_{\text{обр}} = U_{\text{проб}}$ (точка А) характеристика соответствует теоретической. Затем происходит пробой, обратный ток $I_{\text{обр}}$ резко возрастает, диод выходит из строя (участок АВ).

Прямая и обратная ветви характеристики, ввиду значительной разницы прямых и обратных токов и напряжений, изображаются на графике в разных масштабах (см. направления стрелок на графиках и точку излома характеристики в начале координат).

Рабочая часть вольтамперной характеристики опорного диода стабилитрона (рис. 32) находится в области электрического пробоя (участок АВ).

Ход вольтамперных характеристик полупроводниковых диодов сильно зависит от температуры окружающей среды. Повышение температуры приводит к росту прямого и особенно обратного токов. По-

этому в справочниках приводят характеристики для разных температур.

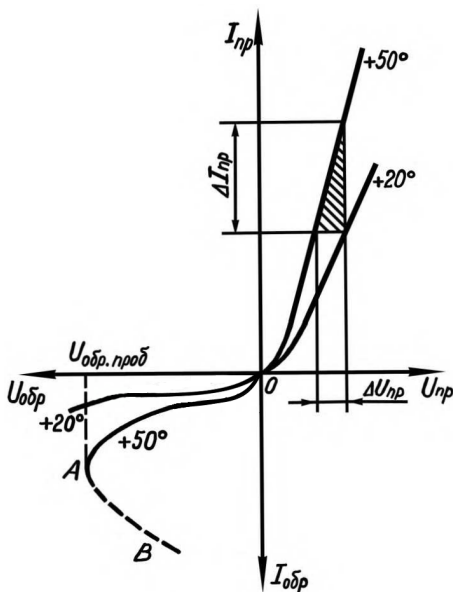


Рис. 31

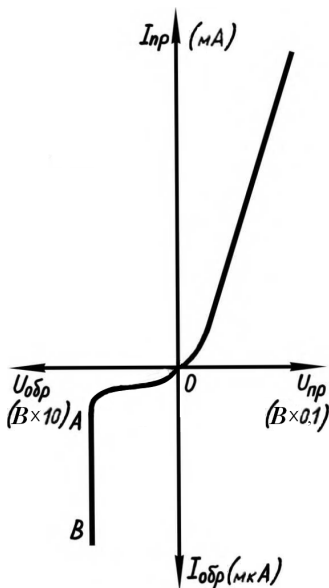


Рис. 32

У опорных диодов положение рабочего участка характеристик от изменения температуры практически не зависит.

Германиевые диоды работают в интервале температур от -60° до $+70^\circ\text{C}$, кремниевые — от -60° до $+200^\circ\text{C}$.

Основные параметры диодов

Для оценки рабочих свойств полупроводниковых диодов наряду с характеристиками используются следующие параметры:

1. Сопротивление диода постоянному току в прямом и обратном направлении.

$$R_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{I_{\text{пр}}} \quad \text{— прямое сопротивление,}$$

$$R_{\text{обр}} = \frac{U_{\text{обр}}}{I_{\text{обр}}} \text{ — обратное сопротивление.}$$

2. Внутреннее сопротивление диода переменному току.

$$R_{\text{ипр}} = \frac{\Delta U_{\text{пр}}}{\Delta I_{\text{пр}}}, \quad R_{\text{иобр}} = \frac{\Delta U_{\text{обр}}}{\Delta I_{\text{обр}}} \text{ (Ом).}$$

3. Крутизна ветвей характеристики.

$$S_{\text{ипр}} = \frac{\Delta I_{\text{пр}}}{\Delta U_{\text{пр}}}, \quad S_{\text{иобр}} = \frac{\Delta I_{\text{обр}}}{\Delta U_{\text{обр}}} \text{ (мА/В).}$$

У опорных диодов эти параметры для рабочего и нерабочего участков обратной ветви характеристики резко различны.

4. Коэффициент выпрямления выпрямительного и детекторного диодов (обычно при $U_{\text{пр}} = [U_{\text{обр}}] = 1 \text{ В}$).

$$K_{\text{в}} = \frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{обр}}} = \frac{R_{\text{обр}}}{R_{\text{пр}}} = \frac{S_{\text{пр}}}{S_{\text{обр}}}$$

Указанные параметры определяются по вольтамперным характеристикам.

К параметрам также относятся предельно допустимые электрические величины, приводимые в справочниках для $t = 20^\circ \text{C}$:

$I_{\text{выпр}}$	—	наибольший выпрямленный ток (среднее значение пульсации), который может длительно проходить через диод;
$U_{\text{обр макс}}$	—	максимально допустимое обратное напряжение;
$I_{\text{обр макс}}$	—	максимальный обратный ток при $U_{\text{обр макс}}$;
$U_{\text{обр проб}}$	—	обратное пробивное напряжение;
$U_{\text{пр}}$	—	прямое падение напряжения на диоде при $I_{\text{выпр}}$;
$f_{\text{пред}}$	—	предельная рабочая частота.

Для опорных диодов указываются:

$I_{\text{пр макс}}$	—	предельно допустимый прямой ток;
$U_{\text{ст}}$	—	напряжение стабилизации (обратное напряжение на участке AB);
$I_{\text{ст макс}}$	—	наибольший ток через стабилитрон в области стабилизации (обратный ток);
$P_{\text{макс}}$	—	наибольшая рассеиваемая на диоде мощность.

Биполярные транзисторы

Принцип действия

Биполярный транзистор или просто транзистор — управляемый полупроводниковый прибор с тремя выводами, состоящий из двух последовательно навстречу включенных $p-n$ -переходов. В зависимости от чередования полупроводников разной проводимости транзисторы делятся на два типа: $p-n-p$ и $n-p-n$, а по конструкции могут быть точечными и плоскостными. В настоящее время точечные транзисторы не применяются. А в общем, транзисторы применяются для усиления (напряжения, тока, мощности) и переключения.

Схема устройства и условные обозначения транзисторов показаны на рис. 33. Средняя область называется базой, одна из крайних областей — эмиттером, другая — коллектором, а соответствующие $p-n$ -переходы — эмиттерным и коллекторным.

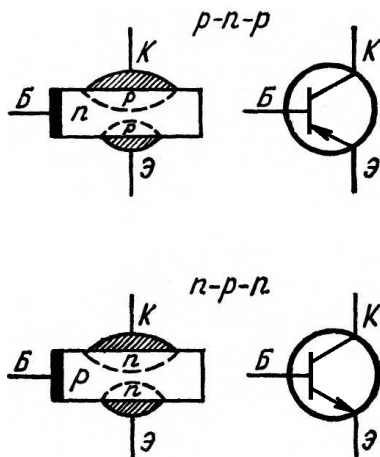


Рис. 33

Рассмотрим работу транзистора типа $p-n-p$ (рис. 34). На коллекторный переход напряжение подается в непроводящем направлении (единицы, десятки вольт). При этом в цепи коллектора возникает очень малый обратный ток $I_{ко}$, обусловленный движением неосновных носителей. При подаче на эмиттерный переход напряжения в прямом направлении (доли вольта) в цепи эмиттера проходит

значительный прямой ток $I_э$. В эмиттерном слое основные носители (дырки) движутся в сторону эмиттерного перехода. Навстречу им в базовом слое движутся электроны.

Базовая область выполняется тонкой и с малым количеством донорной примеси, поэтому в базе основных носителей (электронов) гораздо меньше, чем в эмиттере дырок. В этих условиях в пограничном слое рекомбинирует малое количество дырок (меньше 10%), а основная их часть внедряется в базу, где они являются неосновными носителями. Это явление называется инжекцией (injection — впрыскивание).

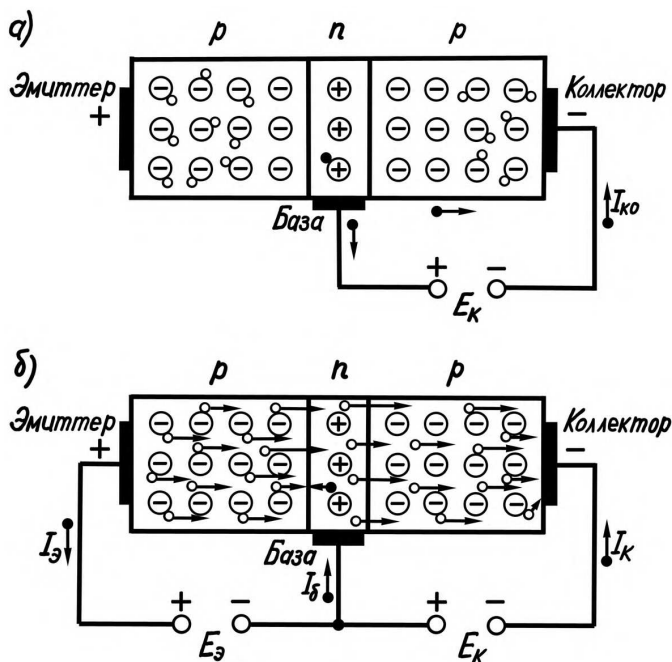


Рис. 34

Попавшие в базу дырки под действием сильного электрического поля коллектора дрейфуют через базовую область к коллектору и проходят коллекторный переход. В результате ток коллектора I_K значительно возрастает.

Если в цепь эмиттера включить источник переменного напряжения $U_{вх}$, эмиттерный ток $I_э$ будет изменяться по закону $U_{вх}$. По такому же закону будет изменяться и ток в цепи коллектора. При этом всегда $I_к = I_э - I_б$. Но так как напряжение на коллекторном переходе значительно больше, чем на эмиттерном, происходит усиление мощности сигнала $U_{вх}$. Именно на этом основано усиление электрических колебаний с помощью транзистора.

Принцип действия транзисторов типа $n-p-n$ аналогичен, но поскольку проводимость эмиттерной, базовой и коллекторной областей иная, полярность питающих напряжений должна быть противоположной.

Схемы включения транзисторов

В зависимости от способа подачи входного сигнала и включения нагрузки транзисторы (по аналогии с электронными лампами) могут работать в трех схемах: с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ) и с общим, коллектором (ОК). Название схемы говорит о том, какой электрод транзистора является общим для источников тока (напряжения) цепей эмиттера и коллектора.

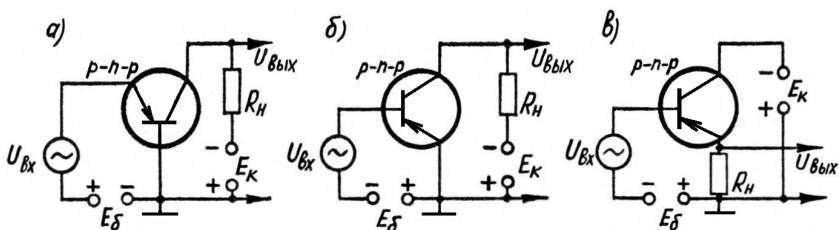


Рис. 35

Схема с общей базой (рис. 35-а) характеризуется малым входным (десятки Ом) и высоким выходным сопротивлением. Поэтому она применяется, если источник усиливаемого сигнала имеет малое внутреннее сопротивление. Усиление по току в ней меньше единицы, однако схема обеспечивает значительное усиление по напряжению и по мощности, а также является хорошим стабилизатором тока. В схеме ОБ отсутствует инверсия фазы входного сигнала.

Схема с общим эмиттером (рис. 35-б) характеризуется более высоким входным (сотни Ом) и более низким выходным сопротивлением по сравнению со схемой ОБ. Схема ОЭ дает усиление по току (в 10 – 100 раз), ее усиление по напряжению и по мощности будет наибольшим из всех схем включения. Поэтому она находит очень широкое применение. В схеме ОЭ происходит инверсия фазы входного напряжения.

Схема с общим коллектором (рис. 35-в) усиления по напряжению не дает, а ее усиление по току одного порядка со схемой ОЭ. Входное сопротивление схемы ОК наибольшее из всех схем включения транзисторов, а выходное сопротивление мало (порядка схемы ОЭ). Эти свойства обуславливают применение схемы ОК при большом внутреннем сопротивлении источника сигнала и низкоомной нагрузке. Инверсии фазы входного сигнала в схеме ОК нет, и она носит название эмиттерного повторителя (по аналогии с ламповым катодным повторителем).

Если в схемах на электронных лампах можно считать, что входная цепь практически не потребляет тока, т.к. входное сопротивление лампы очень велико, то в схемах транзисторных усилителей входная цепь потребляет значительный ток. Это создает неудобства при согласовании отдельных каскадов и усложняет расчет транзисторных схем.

Статические характеристики транзисторов

Характеристики транзистора — функции, показывающие зависимость между токами, проходящими по различным его цепям, и напряжениями на его электродах. Эти функции обычно задаются графически.

В вакуумном триоде для полного определения его поведения в схеме достаточно иметь взаимную зависимость трех величин: анодного тока, напряжения на сетке и напряжения на аноде. В полупроводниковом триоде для этого необходима взаимосвязь между четырьмя величинами: током и напряжением входной цепи, током и напряжением выходной цепи. За независимые переменные принимают $I_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}}$, а за функции — $U_{\text{вх}}$ и $I_{\text{вых}}$. Следовательно, может быть четыре вида статических характеристик:

1. выходные $I_{\text{вых}} = f(U_{\text{вых}})$ при $I_{\text{вх}} = \text{const}$;

2. входные $U_{\text{вх}} = f(I_{\text{вх}})$ при $U_{\text{вых}} = \text{const}$;
3. передачи по току $I_{\text{вых}} = f(I_{\text{вх}})$ при $U_{\text{вых}} = \text{const}$;
4. обратной связи по напряжению $U_{\text{вх}} = f(U_{\text{вых}})$ при $I_{\text{вх}} = \text{const}$.

Для каждой из трех схем включения транзистора существуют свои семейства характеристик (таблица А).

Вид семейств характеристик для схемы ОБ представлен на рис. 36, для схемы ОЭ — на рис. 37.

Таблица А

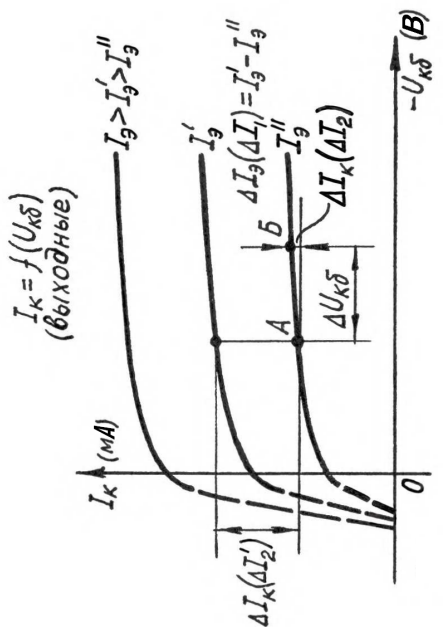
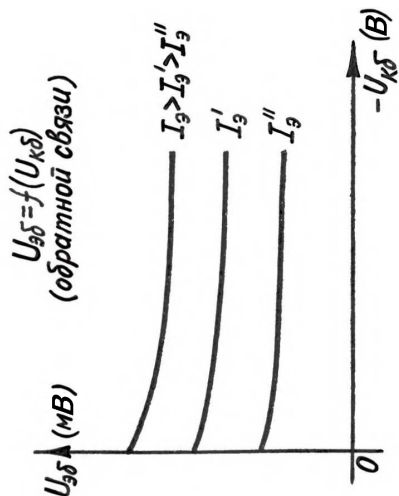
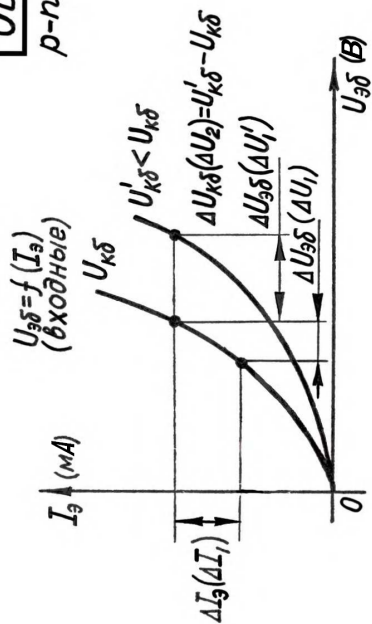
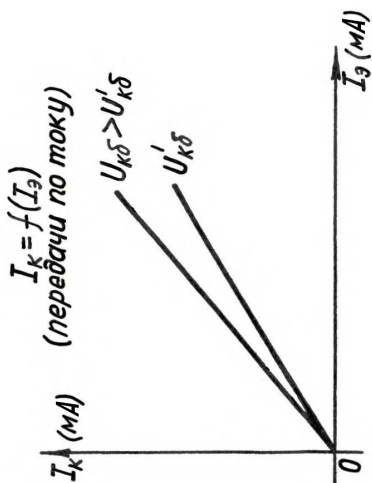
№№ п/п	Схема Вид характеристики	ОБ	ОЭ	ОК
1	Выходные	$I_{\text{к}} = f(U_{\text{кб}})$ при $I_{\text{э}} = \text{const}$	$I_{\text{к}} = f(U_{\text{кэ}})$ при $I_{\text{б}} = \text{const}$	$I_{\text{э}} = f(U_{\text{эк}})$ при $I_{\text{б}} = \text{const}$
2	Входные	$U_{\text{эб}} = f(I_{\text{э}})$ при $U_{\text{кб}} = \text{const}$	$U_{\text{бэ}} = f(I_{\text{б}})$ при $U_{\text{кэ}} = \text{const}$	$U_{\text{бк}} = f(I_{\text{б}})$ при $U_{\text{эк}} = \text{const}$
3	Передачи по току	$I_{\text{к}} = f(I_{\text{э}})$ при $U_{\text{кб}} = \text{const}$	$I_{\text{к}} = f(I_{\text{б}})$ при $U_{\text{кэ}} = \text{const}$	$I_{\text{э}} = f(I_{\text{б}})$ при $U_{\text{эк}} = \text{const}$
4	Обратной связи по напряжению	$U_{\text{эб}} = f(U_{\text{кб}})$ при $I_{\text{э}} = \text{const}$	$U_{\text{бэ}} = f(U_{\text{кэ}})$ при $I_{\text{б}} = \text{const}$	$U_{\text{бк}} = f(U_{\text{эк}})$ при $I_{\text{б}} = \text{const}$

В справочниках обычно приводятся семейства входных и выходных характеристик, как наиболее удобные для расчетов. По двум имеющимся семействам легко строятся остальные. Характеристики транзистора, работающего в любой схеме включения, также можно получить, зная характеристики для какой-либо одной схемы.

Примечание. Индексы при обозначении напряжения означают: первый — название электрода, потенциал которого измеряется, второй — название электрода, относительно которого производится измерение.

Об

p-n-p



ОЗ

p-n-p

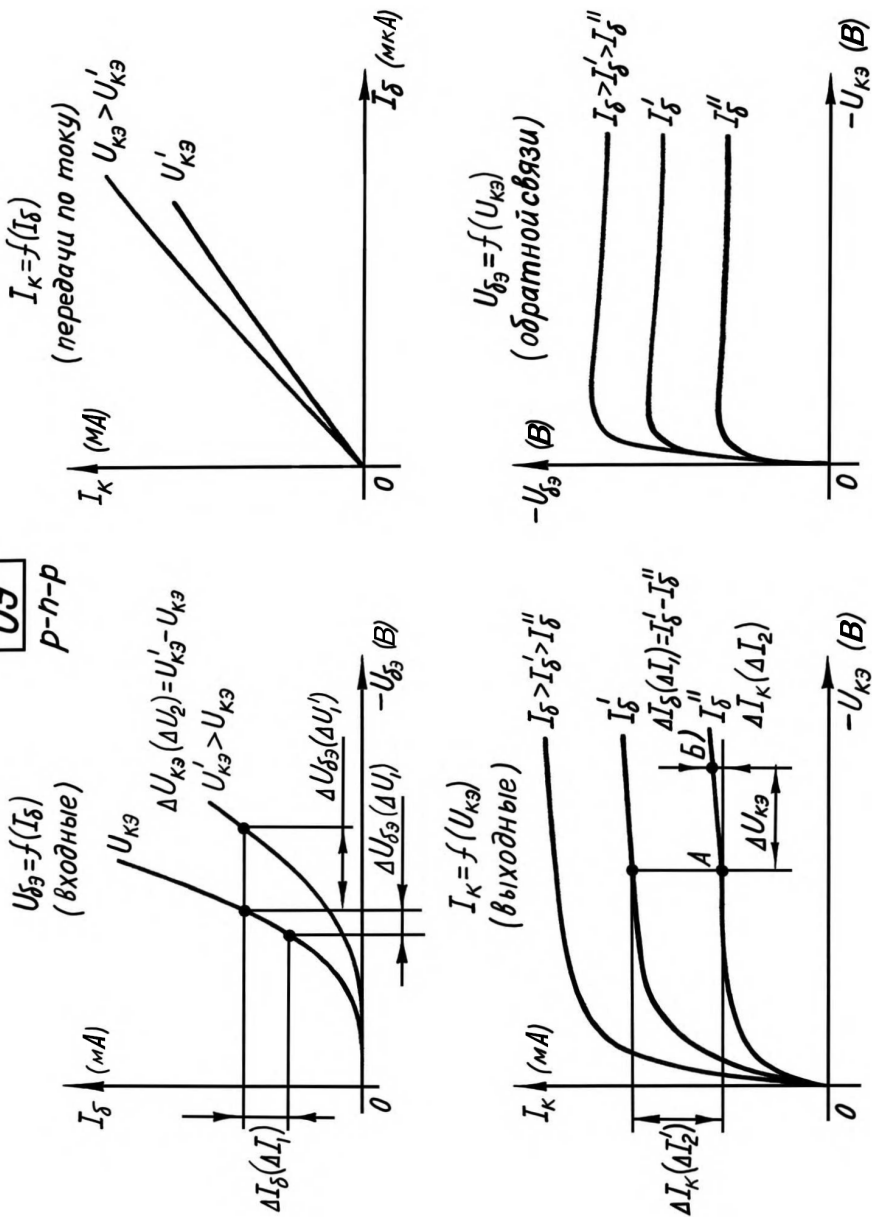


Рис. 37

Параметры транзисторов

Для оценки свойств полупроводниковых триодов, помимо характеристик, применяются характеристические (или эквивалентные) параметры. Они представляют собой величины, показывающие зависимость между малыми изменениями токов и напряжений в приборе.

При этом транзистор рассматривается как активный четырехполюсник, на входе которого действует напряжение U_1 и ток I_1 , а на выходе — напряжение U_2 и ток I_2 (рис. 38). Направление токов и напряжений принято таким, как показано на рисунке.

Вообще, любые два из четырех переменных I_1 ; I_2 ; U_1 и U_2 могут быть выбраны в качестве независимых. Возможны шесть различных вариантов выбора, однако практическое распространение получили только три. При выборе независимыми переменными U_1 и U_2 получаем систему так называемых Y —параметров, имеющих размерность проводимости; при выборе I_1 и I_2 — систему Z —параметров, имеющих размерность сопротивления, и при выборе I_1 и U_2 получаем систему H —параметров (смешанную).

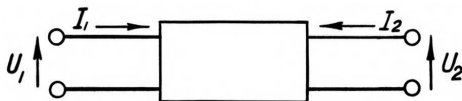


Рис. 38

Наибольшее практическое применение получила система H —параметров, поэтому системы Y —параметров и Z —параметров здесь не рассматриваются.

В системе H —параметров

$$\begin{cases} U_1 = f_1(I_1; U_2), \\ I_2 = f_2(I_1; U_2). \end{cases}$$

Для постоянных значений токов и напряжений можно записать:

$$\begin{cases} U_1 = H_{11}I_1 + H_{12}U_2, \\ I_2 = H_{21}I_1 + H_{22}U_2. \end{cases}$$

Для оценки бесконечно малых амплитуд переменных продиффе-

ренцируем эти выражения по I_1 и U_2 и получим:

$$\begin{cases} dU_1 &= \frac{\partial U_1}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial U_1}{\partial U_2} dU_2, \\ dI_2 &= \frac{\partial I_2}{\partial I_1} dI_1 + \frac{\partial I_2}{\partial U_2} dU_2. \end{cases}$$

Обозначим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_1}{\partial I_1} = H_{11} & \quad \text{— входное сопротивление при коротком замыкании} \\ & \quad \text{на выходе по переменной составляющей } (dU_2 = 0); \\ \frac{\partial U_1}{\partial U_2} = H_{12} & \quad \text{— коэффициент обратной связи по напряжению} \\ & \quad \text{при холостом ходе на входе } (dI_1 = 0); \\ \frac{\partial I_2}{\partial I_1} = H_{21} & \quad \text{— коэффициент усиления по току при коротком} \\ & \quad \text{замыкании на выходе } (dU_2 = 0); \\ \frac{\partial I_2}{\partial U_2} = H_{22} & \quad \text{— выходная проводимость при холостом ходе} \\ & \quad \text{на входе } (dI_1 = 0). \end{aligned}$$

На низких частотах рассматриваемые параметры имеют активный характер и не зависят от частоты, поэтому они могут определяться по статическим характеристикам и соответственно обозначаются:

$$\begin{aligned} h_{11} = \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} & \quad \text{— входное сопротивление при коротком замыкании} \\ & \quad \text{по переменной составляющей на выходе } (\Delta U_2 = 0); \\ h_{12} = \frac{\Delta U_1'}{\Delta U_2} & \quad \text{— коэффициент обратной связи по напряжению} \\ & \quad \text{при холостом ходе на входе } (\Delta I_1 = 0); \\ h_{21} = \frac{\Delta I_2'}{\Delta I_1} & \quad \text{— коэффициент усиления по току при коротком} \\ & \quad \text{замыкании на выходе } (\Delta U_2 = 0); \\ h_{22} = \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2} & \quad \text{— выходная проводимость при холостом ходе} \\ & \quad \text{на входе } (\Delta I_1 = 0). \end{aligned}$$

Необходимые для расчета параметров величины ΔU_1 ; ΔI_1 ; ΔU_2 ; ΔI_2 при выбранной схеме включения и выбранной рабочей точке определяются по двум любым семействам статических характеристик (рис. 36 и 37).

В справочниках приводятся параметры транзистора для какой-либо одной схемы включения. Для расчета параметров в другой схеме пользуются переходными формулами (таблица В).

Параметры транзисторов сильно зависят от условий внешней среды (температура, радиация, электрические и магнитные поля) и имеют большой разброс.

Таблица В

Схема включения		
ОБ	ОЭ	ОК
$h_{11б} = \frac{h_{11э}}{A} = \frac{h_{11к}}{ h_k }$	$h_{11э} = \frac{h_{11б}}{B} = h_{11к}$	$h_{11к} = \frac{h_{11б}}{B} = h_{11э}$
$h_{12б} = \frac{ h_э - h_{12э}}{A} =$ $= \frac{ h_k + h_{21к}}{ h_k }$	$h_{12э} = \frac{ h_б - h_{12б}}{B} =$ $= 1 - h_{12к}$	$h_{12к} = -\frac{1 - h_{12б}}{B} =$ $= 1 - h_{12э}$
$h_{21б} = \frac{- h_э - h_{21э}}{A} =$ $= \frac{h_{12к} - h_k }{ h_k }$	$h_{21э} = \frac{- h_б - h_{21б}}{B} =$ $= -(1 + h_{21к})$	$h_{21к} = \frac{1 + h_{21б}}{B} =$ $= (1 + h_{21э})$
$h_{22б} = \frac{h_{22э}}{A} = \frac{h_{22к}}{h_k}$	$h_{22э} = \frac{h_{22б}}{B} = h_{22к}$	$h_{22к} = \frac{h_{22б}}{B} = h_{22э}$
где: $A = 1 + h_э + h_{21э} - h_{12э}$ $B = 1 + h_б + h_{21б} - h_{12б}$ $h_б = h_{11б}h_{22б} - h_{12б}h_{21б}$ $h_э = h_{11э}h_{22э} - h_{12э}h_{21э}$ $h_k = h_{11к}h_{22к} - h_{12к}h_{21к}$ В литературе часто встречаются обозначения: $\alpha = h_{21б} \quad \alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}; \quad \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$ $\beta = h_{21э}$		

Ориентировочные значения h -параметров транзисторов для различных схем включения указаны в таблице С.

Таблица С

Схема Параметр	ОБ	ОЭ	ОК
h_{11} (Ом)	40	200	2000
h_{12}	$4 \cdot 10^{-4}$	$20 \cdot 10^{-4}$	1
h_{21}	1	50	50
h_{22} $\left(\frac{1}{\text{Ом}}\right)$	10^{-6}	$50 \cdot 10^{-6}$	$50 \cdot 10^{-6}$

Униполярные (полевые) транзисторы

Принцип действия

В основе работы любого усилительного элемента лежит изменение тока в выходной цепи под действием входного (управляющего) сигнала. В общем случае ток в выходной цепи определяется выражением.

$$I = qnvS,$$

- где q — заряд носителя (обычно e — заряд электрона);
 n — концентрация носителей;
 ν — скорость движения носителей;
 S — проводящее сечение проводника.

В электронных лампах изменение напряженности электрического поля между электродами приводит к изменению скорости ν электронов и, следовательно, к изменению тока I .

В транзисторах биполярных (с двумя видами используемых носителей и с двумя p - n -переходами) управление выходным током I_c осуществляется изменением количества носителей n (электронов или дырок), инжектированных из эмиттера в базу, т.е. имеет место токовое управление.

В транзисторах униполярных (с использованием только одного любого вида носителей) управление выходным током I достигается путем изменения проводящего значения S под воздействием электрического поля, создаваемого управляющим сигналом. Поэтому униполярные транзисторы часто называют полевыми. В зависимости от конструкции и характера работы различают полевые транзисторы:

- p – n -переходом;
- с изолированным затвором и индуцированным каналом;
- с изолированным затвором и встроенным каналом.

Полевой транзистор с p – n -переходом

Конструктивно такой транзистор (рис. 39) представляет собой кристалл полупроводника очень слабо легированного примесью (на рисунке — акцепторной), что обуславливает его малую проводимость (в данном случае p -типа). В кристалле создана область с противоположной проводимостью, образующая с основной частью кристалла p – n -переход. От противоположных концов области сделаны выводы: исток (И) и сток (С). От n -области третий вывод-затвор (З).

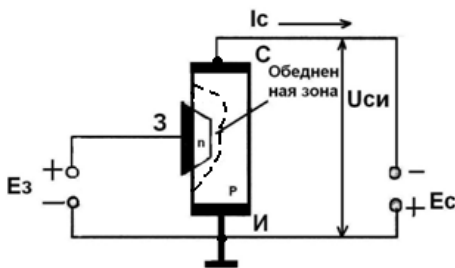


Рис. 39

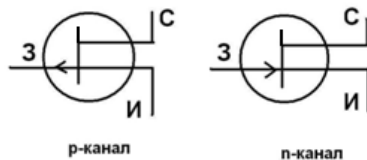


Рис. 40

Если напряжение на затворе относительно истока $U_{зи} = 0$, вблизи p – n -перехода образуется обедненная зона (её граница в p -области показана штриховой линией). При подаче на сток напряжения U относительно истока через p область пойдет ток I_c . В обедненной зоне основные носители отсутствуют, поэтому проводящим будет канал в p -области сечением S , лежащий за пределами обедненной зоны.

Из теории p – n -перехода известно, что приложение к нему обратного (запирающего) напряжения $U_{зи}$ приводит к расширению обедненной зоны и, следовательно, к уменьшению проводящего сечения канала. Его сопротивление возрастает, ток I_c уменьшается. При увеличении $U_{зи}$ до некоторого $U_{зи} = U_{зи\text{отс}}$ называемого напряжением отсечки, проводящее сечение S станет равным нулю, ток I_c практически прекратится. Таким образом, изменяя $U_{зи}$ можно управлять I_c .

Подача прямого $U_{зи}$ на p – n -переход полевого транзистора не применяется, так как при прямых $U_{зи} \geq 0,1\text{ В}$, возникает значительный ток затвора $I_з$ и транзистор выходит из строя.

Полевой транзистор с p – n -переходом работает при обратном $U_{зи}$, поэтому ток затвора $I_з$ чрезвычайно мал (порядка 10 нА), а входное сопротивление, в отличие от биполярных транзисторов, очень велико.

Полевые транзисторы изготавливаются из кремния, так как невозможно получить германиевый кристалл с достаточно большим сопротивлением. Полевые транзисторы могут быть как с p -каналом, так и с n -каналом. Для последних полярность питающих напряжений – противоположная. Условные обозначения на принципиальных схемах показаны на рис. 40.

Статические характеристики и параметры

У полевых транзисторов ток затвора практически равен нулю, поэтому для описания их работы достаточно иметь взаимную зависимость трех величин

$$f(U_{вх}; U_{вых}; I_{вых}) = 0. \quad (1)$$

Принимая за независимые переменные $U_{вх}$ и $U_{вых}$, а за функцию $I_{вых}$, имеем в явном виде

$$I_{вых} = f(U_{вх}; U_{вых}) \quad \text{или} \quad I_c = f(U_{зи}; U_{си}). \quad (2)$$

Задавая фиксированные значения одному из аргументов, получим два семейства характеристик:

- а) стоковые $I_c = f(U_{си})$ при $U_{зи} = const$;
- б) стокзатворные $I_c = f(U_{зи})$ при $U_{си} = const$.

Для расчета схем на полевом транзисторе при любом его включении (с общим истоком — ОИ, с общим стоком — ОС, с общим затвором — ОЗ) достаточно иметь одно из этих семейств для одной из схем включения. В справочниках обычно приводятся семейства характеристик для наиболее употребляемой схемы ОИ. Чаще используется, семейство:

$$I_c = f(U_{си}).$$

Семейства стоковых и стокзатворных характеристик для транзистора с $p-n$ -переходом и p -каналом в схеме с ОИ приведены на рис. 41. Для других типов полевых транзисторов положение характеристик относительно осей координат, иное. Однако ход кривых сохраняется.

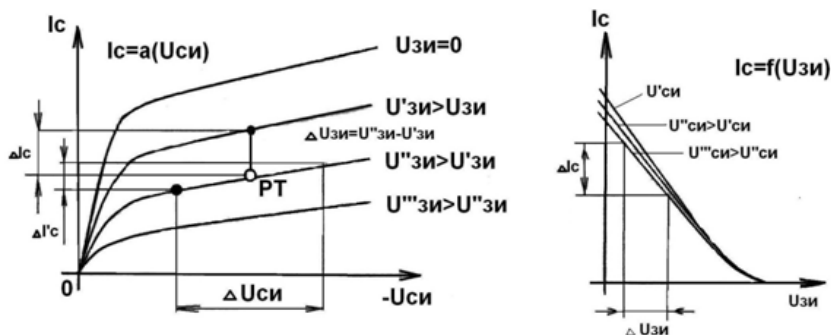


Рис. 41

Существует два метода расчета схем: графо-аналитический, требующий графических построений на графике семейства статических характеристик, и приближенный аналитический по статическим параметрам.

Для определения статических параметров возьмем полный дифференциал выражения

$$dI_c = \frac{\partial I_c}{\partial U_{зи}} dU_{зи} + \frac{\partial I_c}{\partial U_{си}} dU_{си}, \quad (3)$$

где $\frac{\partial I_c}{\partial U_{зи}} = S$ — крутизна стокзатворной характеристики,

$\frac{\partial I_c}{\partial U_{си}} = Y_i = \frac{1}{R_i}$ — выходная проводимость транзистора.

Приравняв dI_c нулю и используя введенные обозначения, имеем,

$$0 = SdU_{зи} + \frac{1}{R_i}dU_{си}.$$

Учитывая противоположность знаков $dU_{зи}$ и $dU_{си}$, получим третий параметр — коэффициент усиления:

$$\mu = \frac{dU_{си}}{dU_{зи}} = SR_i. \quad (4)$$

Формула (4), связывающая все три параметра полевого транзистора, аналогична внутреннему уравнению электронной лампы.

Статические параметры полевого транзистора можно определить по любому семейству характеристик, но удобнее и точнее по стоковым. Необходимые, для этого построения показаны на рис. 41, в расчетные формулы вместо дифференциалов подставляются конечные приращения:

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} \text{ (мА/В)}; \quad R_i = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_c} \text{ (кОм)}; \quad \mu = \frac{\Delta U_{си}}{\Delta U_{зи}}. \quad (5)$$

Как и для пентодов определение μ графически невозможно, поэтому его рассчитывают по формуле (4).

Из вышеизложенного видно, что определение статических параметров полевых транзисторов и электронных ламп аналогично.

Динамические характеристики и параметры

Режим работы усилительного элемента с нагрузочным сопротивлением в выходной цепи называется динамическим (рабочим) режимом. При наличии нагрузки R_c в цепи стока полевого транзистора изменение входного напряжения $U_{зи}$ приводит к изменению не только тока стока I_c , но и напряжения на стоке $U_{си}$. В этом случае изменение I_c происходит не по статической, а по динамической характеристике, описываемой II-м законом Кирхгофа:

$$R_c = U_{си} + I_c R_c, \quad (6)$$

где $E = const$ — Э.Д.С. источника питания цепи стока. Это уравнение динамического режима есть линейная зависимость тока стока от напряжения на стоке и в системе координат изображается прямой.

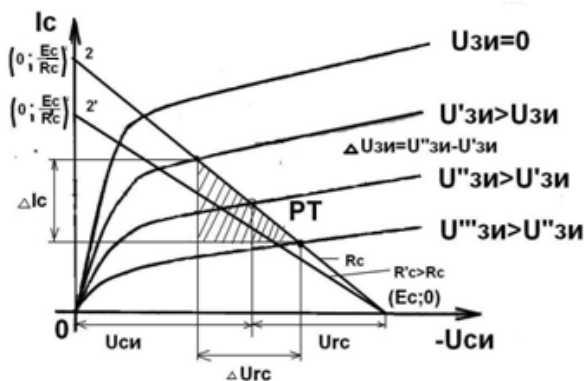


Рис. 42

Динамическая стоковая характеристика (линия нагрузки) строится на семействе статических стоковых характеристик (рис. 42) по двум точкам:

$$(I_c = 0; U_{си} = E) \quad \text{и} \quad \left(I_c = \frac{E_c}{R_c}; U_{си} = 0 \right).$$

Крутизна S_∂ динамической стокзатворной характеристики и динамический коэффициент усиления μ_∂ становится меньше чем статические крутизна S и коэффициент усиления μ_∂ .

Динамические параметры S_∂ и μ_∂ можно определить графически (рис.42) с учетом соотношений

$$S_\partial = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} \text{ (мА/В)}; \quad \mu_\partial = \frac{\Delta U_{R_c}}{\Delta U_{зи}} \quad (7)$$

и аналитически по статическим параметрам

$$S_\partial = S \frac{R_i}{R_i + R_c}; \quad \mu_\partial = \mu \frac{R_c}{R_i + R_c}. \quad (8)$$

Формулы (8) получаются из анализа эквивалентных схем усилительного каскада на полевом транзисторе.

Работа № 7

Полупроводниковые диоды

Цель работы — снятие и анализ вольтамперных характеристик выпрямительных, детекторных и опорных полупроводниковых диодов. Исследование работы опорного диода в схеме стабилизации.

Литература. [1]; [2]; [3]; [4]; [5]; [6].

I. Описание установки

Лабораторная установка для исследования диодов состоит из панели, на которой собираются все необходимые схемы, лабораторного выпрямителя и измерительных приборов.

Изменение подводимых к схемам напряжений производится регуляторами выпрямителя.

Вольтамперные характеристики диодов снимаются в два приема: правая ветвь характеристики — при прямом включении диода (схема рис. 43-а), левая ветвь — при обратном включении (схема рис. 43-б).

Пределы изменения питающих напряжений и пределы измерения вольтметров указаны на схемах для диодов, исследуемых в настоящей работе (в схеме рис. 43-б в скобках для опорных диодов). Пределы измерения миллиамперметров выбираются в соответствии с паспортными данными исследуемого диода.

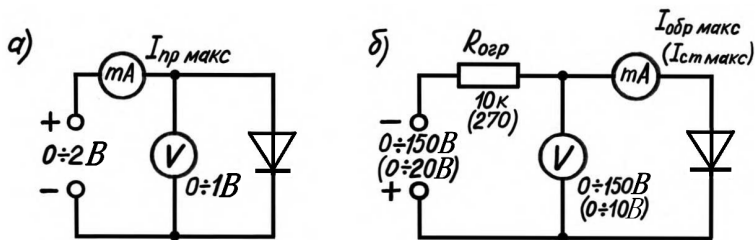


Рис. 43

Рабочие характеристики кремниевого стабилитрона снимаются в схеме стабилизации напряжения постоянного тока (рис. 44).

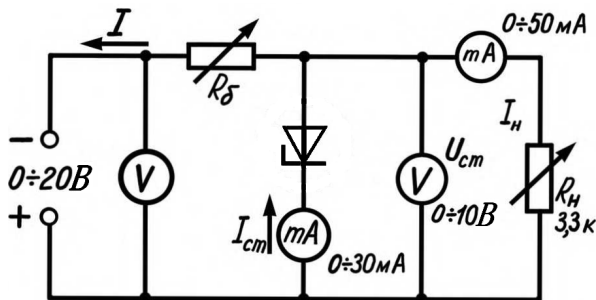


Рис. 44

Расчет балластного сопротивления R производится по формулам, приведенным в параграфе «Газоразрядные стабилитроны», стр. 29.

II. Оборудование и приборы

1. Лабораторная панель.
2. Лабораторный стабилизированный, регулируемый выпрямитель.
3. Вольтметр ламповый универсальный ВК7-3 (А4-М2) для измерения $U_{пр}$ и $U_{обр}$.
4. Вольтметр постоянного тока ($0 \div 20$ В).
5. Тестер ТТ 1 для измерения $I_{пр}$ и $I_{обр}$.
6. Миллиамперметр ($0 \div 30$ мА).
7. Исследуемые диоды.

III. Лабораторное задание

1. Получить у преподавателя задание с указанием типов исследуемых диодов.
2. Ознакомиться по справочнику с основными электрическими данными и типовыми характеристиками заданных диодов.

3. Снять вольтамперные характеристики ($I = f(U)$) исследуемых диодов.

Каждую собранную схему предъявлять на проверку преподавателю.

Предупреждение. При снятии характеристик не допускать превышения $I_{\text{пр макс}}$, $U_{\text{обр макс}}$, $I_{\text{обр макс}}$.

Правую ветвь вольтамперных характеристик всех диодов (точечных, выпрямительных, опорных) снимать, плавно повышая напряжение $U_{\text{пр}}$ от нуля до значения $U_{\text{пр}}$, при котором $I_{\text{пр}}$ не превышает $(0,7 \div 0,8) I_{\text{пр макс}}$. Величину $I_{\text{пр}}$ регистрировать через каждые $0,05 \text{ В}$.

Левую ветвь характеристик точечных и плоскостных выпрямительных диодов снимать, плавно увеличивая $U_{\text{обр}}$ от нуля до $U_{\text{обр}} = (0,7 \div 0,8) U_{\text{обр макс}}$. Измерения $I_{\text{обр}}$ произвести не менее чем в 10 точках.

Левая ветвь вольтамперной характеристики опорного диода снимается иначе:

- плавно увеличивать напряжение $U_{\text{обр}}$ от нуля до резкого возрастания $I_{\text{обр}}$. Измерения $I_{\text{обр}}$ производить через 1 В ;
- уменьшить $U_{\text{обр}}$ на $0,5 \text{ В}$ и продолжать снятие характеристики, изменяя напряжение через $0,05 \text{ В}$ до достижения $I_{\text{обр}} = (0,8 \div 0,9) I_{\text{ст макс}}$.

Результаты измерений свести в таблицу 1, по данным которой на отдельных чертежах построить характеристики.

Таблица 1

Точечный диод (тип)				Плоскостной выпрямительный диод (тип)				Опорный диод (тип)			
$U_{\text{пр}}$ (В)	$I_{\text{пр}}$ (мА)	$U_{\text{обр}}$ (В)	$I_{\text{обр}}$ (мкА)	$U_{\text{пр}}$ (В)	$I_{\text{пр}}$ (мА)	$U_{\text{обр}}$ (В)	$I_{\text{обр}}$ (мкА)	$U_{\text{пр}}$ (В)	$I_{\text{пр}}$ (мА)	$U_{\text{обр}}$ (В)	$I_{\text{обр}}$ (мА)

4. По вольтамперным характеристикам определить для каждого диода:
 - а) внутреннее сопротивление $R_{\text{вн}}$ у детекторных и выпрямительных диодов и $R_{\text{обр}}$ у опорных диодов (на прямолинейном участке характеристики);
 - б) крутизну характеристики $S_{\text{пр}}$ для детекторных и выпрямительных и $S_{\text{обр}}$ для опорных диодов (на том же участке);
 - в) коэффициент выпрямления $K_{\text{в}}$ при $U = \pm 0,5$ В для детекторных и выпрямительных диодов.
5. Собрать схему стабилизации напряжения (рис. 44) для испытания кремниевого стабилитрона (опорного диода) при заданном $R_{\text{б}}$ (см. карточку-задание стр. 92-94). Схему предъявить преподавателю для проверки.
6. В схеме стабилизации напряжения при неизменной нагрузке $R_{\text{н}}$ снять зависимость выходного напряжения от входного $U_{\text{ст}} = f(U)$.

Величина $R_{\text{н}}$ и пределы изменения U указаны в карточке-задании. Результаты измерений свести в таблицу 2, по данным которой построить характеристику.
7. В схеме стабилизации напряжения снять рабочие характеристики $U_{\text{ст}} = f(I_{\text{н}})$ и $I_{\text{ст}} = f(I_{\text{н}})$ — зависимости выходного напряжения и тока через стабилитрон от тока нагрузки.

Для этого при наибольшей величине $R_{\text{н}}$ подать входное напряжение U . Поддерживая U постоянным, изменять $I_{\text{н}}$ (путем уменьшения $R_{\text{н}}$) до прекращения стабилизации.

Результаты свести в таблицу III, по данным которой на одном графике построить зависимости $U_{\text{ст}} = f(I_{\text{н}})$, $I_{\text{ст}} = f(I_{\text{н}})$ и $I = I_{\text{ст}} + I_{\text{н}} = f(I_{\text{н}})$.

IV. Содержание отчета

1. Паспортные данные исследуемых диодов.
2. Схема исследования.

3. Таблицы измерений и графики снятых зависимостей (п.п. 3, 6, 7).
4. Расчеты к п. 4.

V. Контрольные вопросы

1. Что называется вольтамперной характеристикой диода?
2. Почему вольтамперные характеристики полупроводниковых диодов по сравнению с вакуумными имеют большую крутизну в прямом направлении?
3. Почему полупроводниковые диоды уступают вакуумным в отношении величины $U_{\text{обр макс}}$?
4. В чем разница в конструкции и свойствах точечных и плоскостных диодов?
5. Почему неудобно вольтамперную характеристику полупроводникового диода показывать в одном масштабе для прямого и обратного токов?
6. Перечислить и пояснить основные параметры полупроводниковых диодов.
7. Что называется прямым и обратным сопротивлением диода?
8. Почему в качестве материала для опорных диодов используется кремний, а не германий?
9. Чем ограничена величина наибольшего тока стабилизации опорного диода?
10. Рассказать о применении диодов.

Работа № 8А

Биполярные транзисторы

Цель работы — снятие и анализ входных и выходных статических характеристик транзисторов в схемах с общей базой (ОБ) и с общим эмиттером (ОЭ); определение h -параметров.

Литература. [1]; [2]; [3]; [4]; [5]; [6].

I. Описание установки

В лабораторную установку для исследования транзисторов входят: панель для сборки схем, лабораторный выпрямитель и измерительные приборы. Изменение подводимых к схемам напряжений осуществляется регуляторами выпрямителя.

Экспериментальное снятие статических характеристик транзистора типа $p-n-p$, включенного по схеме ОБ, осуществляется с помощью схемы (рис. 45), транзистора, включенного по схеме ОЭ — (рис. 46). Для испытания транзисторов типа $n-p-n$ полярность подводимых к схемам напряжений должна быть противоположной.

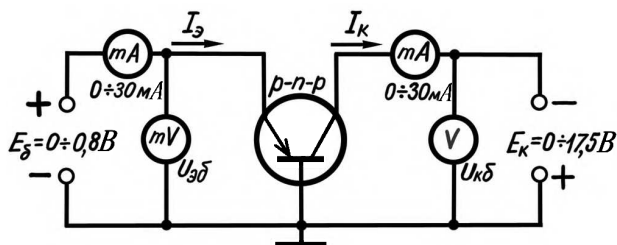


Рис. 45

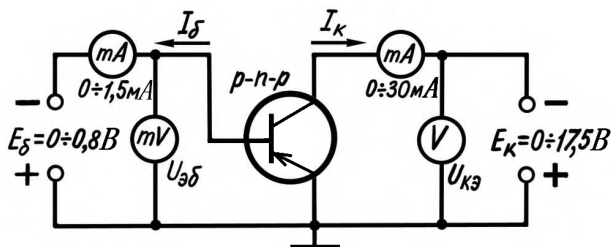


Рис. 46

С целью уменьшения погрешностей миллиамперметр в цепях эмиттера (ОБ) и базы (ОЭ), имеющий обычно большее сопротивление, чем входное сопротивление транзистора, целесообразно включать до милливольтметра.

II. Используемая аппаратура и оборудование

1. Лабораторная панель для сборки схем исследования.
2. Лабораторный стабилизированный, регулируемый выпрямитель с выходами $0 \div 0,8 \text{ В}$ (для питания входных цепей) и $0 \div 17,5 \text{ В}$ (для питания выходных цепей).
3. Ламповые вольтметры В7-2 (ВЛУ-2) или ВК7-3 (А4-М2) для измерения входных и, выходных напряжений — 2 шт.
4. Миллиамперметр ЛМ-1 со шкалой $0 \div 30 \text{ мА}$ для измерения тока коллектора.
5. Миллиамперметр ЛМ-1 со шкалой $0 \div 15 \text{ мА}$ и $(0 \div 30 \text{ мА})$ (переключаются тумблером) для измерения входного тока.
6. Исследуемые транзисторы.

III. Лабораторное задание

Получить указания преподавателя по выполнению лабораторной работы.

Предупреждение. При выполнении работы во избежание выхода из строя транзисторов не допускается:

1. Включение питающих напряжений неправильной полярности.
2. Превышение (даже кратковременное) предельно допустимых токов в цепях транзистора и напряжений на его электродах.
3. Разрыв цепи базы при наличии напряжения на других электродах. Установку транзистора в гнезда лабораторной панели (после опробования схемы) производить при нулевых показаниях вольтметров.

А. Исследование по схеме ОБ

1. Собрать схему установки для исследования транзистора при включении с общей базой (рис. 45), предъявить преподавателю на проверку.

2. Опробовать схему:

- а) Вынуть исследуемый транзистор из панели и включить блок питания.
- б) Проверить по вольтметрам возможность плавной регулировки $U_{кб}$ и $U_{эб}$.
- в) Установить $U_{кб}$ и $U_{эб}$ равными нулю, вставить транзистор. Подать $U_{кб}$ в пределах 30 – 50% от максимального для исследуемого транзистора и, поддерживая его постоянным, убедиться в изменении тока $I_к$ при изменении $I_э$.

3. Снять семейство входных характеристик $I_э = f(U_{эб})$ для нескольких значений $U_{кб}$.

Значения $U_{кб}$, пределы изменения $U_{эб}$, а также $I_{э \text{ макс}}$ для заданных транзисторов указаны в карточке-задании (стр. 95).

Порядок измерений: установив заданное $U_{кб}$ и поддерживал его постоянным, плавно повышать $U_{эб}$. При этом следить, чтобы $I_э$ не превысил $I_{э \text{ макс}}$.

Результаты измерений свести в таблицу 1 и построить семейство характеристик.

4. Снять семейство выходных характеристик $I_к = f(U_{кб})$ для нескольких значений $I_э$ (см. карточку-задание стр. 95).

Таблица 1

$I_э = f(U_{эб})$ при $U_{кб} = const$			
$U_{эб}$ (В)	$I_э$ (мА)		
	при $U_{кб} =$ В	при $U_{кб} =$ В	при $U_{кб} =$ В

Для этого, установив заданный $I_э$ (установка $I_э$ осуществляется путем изменения $U_{эб}$) и поддерживая его постоянным, плавно повышать $U_{кб}$. При этом следить, чтобы $I_к$ не превысил $I_{к \text{ макс}}$.

Результаты измерений свести в таблицу 2 и построить характеристики.

Таблица 2

$I_K = f(U_{KБ})$ при $I_Э = const$			
$U_{KБ}$ (В)	I_K (мА)		
	при $I_Э =$ мА	при $I_Э =$ мА	при $I_Э =$ мА

- По построенным характеристикам определить h —параметры для схемы ОБ ($h_{11б}$; $h_{12б}$; $h_{21б}$; $h_{22б}$).
- По полученным $h_б$ —параметрам рассчитать $h_э$ —параметры (схема ОЭ). Расчетные формулы привести в отчете.

Результаты определения $h_б$, $h_э$ и паспортные данные из справочника свести в таблицу 3, произвести их сравнение.

Таблица 3

	Тип транзистора			
	паспортные данные ОБ	результат ОБ	паспортные данные ОЭ	результат ОЭ
Входное сопротивление h_{11}				
Коэффициент обратной связи по напряжению h_{12}				
Коэффициент усиления по току h_{21}				
Выходная проводимость h_{22}				

Б. Исследование по схеме ОЭ

- Собрать схему установки для исследования транзистора при включении с общим эмиттером (рис. 46), предъявить преподавателю на проверку.
- Опробовать схему:

- а) Вынуть исследуемый транзистор из панели и включить блок питания.
 - б) Проверить по вольтметрам возможность плавной регулировки $U_{кэ}$ и $U_{бэ}$.
 - в) Установить $U_{кэ}$ и $U_{бэ}$ равными нулю, вставить транзистор. Подать $U_{кэ}$ в пределах 30–50% от максимального (для исследуемого транзистора) и поддерживая его постоянным, убедиться в изменении тока коллектора $I_к$ при изменении тока базы $I_б$.
3. Снять семейство входных характеристик $I_б = f(U_{бэ})$ при нескольких значениях напряжения на коллекторе $U_{кэ}$.

Значения $U_{кэ}$, пределы изменения $U_{бэ}$, а также $I_{к \text{ макс}}$ для заданных транзисторов указаны в карточке-задании (стр. 95).

Порядок измерений: установив заданное $U_{кэ}$ и поддерживая его постоянным, плавно повышать $U_{бэ}$. При этом следить, чтобы $I_к$ не превысил $I_{к \text{ макс}}$.

Результаты измерений свести в таблицу 4 и построить характеристики.

Таблица 4

$I_б = f(U_{бэ})$ при $U_{кэ} = const$			
$U_{бэ}$ (В)	$I_б$ (мА)		
	при $U_{кэ} =$ В	при $U_{кэ} =$ В	при $U_{кэ} =$ В

4. Снять семейство выходных характеристик $I_к = f(U_{кэ})$ для нескольких значений $I_б$ (см. карточку-задание стр. 95).

Для этого, установив заданный $I_б$ (установка $I_б$ осуществляется путем изменения $U_{бэ}$) и поддерживая его постоянным, плавно повышать $U_{кэ}$. При этом следить, чтобы $I_к$ не превысил $I_{к \text{ макс}}$.

Результаты измерений свести в таблицу 5 и построить характеристики.

Таблица 5

$I_K = f(U_{KЭ})$ при $I_6 = const$			
$U_{KЭ}$ (В)	I_K (мА)		
	при $I_6 =$ мА	при $I_6 =$ мА	при $I_6 =$ мА

- По построенным характеристикам определить $h_э$ —параметры ($h_{11э}$; $h_{12э}$; $h_{21э}$; $h_{22э}$).
- По полученным в п. 5 $h_э$ —параметрам рассчитать h_6 —параметры. Расчетные формулы привести в отчете.

Результаты определения $h_э$, h_6 и паспортные данные из справочника свести в таблицу 6, произвести их сравнение.

Таблица 6

	Тип транзистора			
	паспортные данные ОЭ	результат ОЭ	паспортные данные ОБ	результат ОБ
Входное сопротивление h_{11}				
Коэффициент обратной связи по напряжению h_{12}				
Коэффициент усиления по току h_{21}				
Выходная проводимость h_{22}				

IV. Содержание отчета

- Основные электрические данные исследуемых транзисторов (номинальные и предельно допустимые).

2. Схема исследования.
3. Результаты измерений п.п. 3а (3б) и 4а (4б) лабораторного задания, сведенные в таблицы, и построенные по ним графики.
4. Результаты выполнения п.п. 5а (5б) и 6а (6б) сведенные в таблицы.

V. Контрольные вопросы

1. Рассказать об устройстве и принципе работы плоскостного транзистора.
2. Чем отличается управление током коллектора транзистора от управления анодным током электронной лампы?
3. Кратко охарактеризовать возможные схемы включения транзисторов.
4. Чем объяснить отсутствие усиления по току в схеме ОБ?
5. Объяснить процесс усиления по току в схеме ОЭ.
6. Перечислить основные статические характеристики транзисторов.
7. Назвать h -параметры транзистора и объяснить их физический смысл.
8. Как определяются h -параметры транзисторов по статическим характеристикам?
9. Приведите соотношения между коэффициентом усиления по току транзистора в схемах ОЭ и ОБ.
10. Каковы преимущества и недостатки транзисторов по сравнению с электронными лампами?

Работа № 8Б

Униполярные (полевые) транзисторы

Цель работы — изучение принципа работы, снятие и анализ стоковых и стокзатворных характеристик и определение параметров полевого транзистора с p -каналом и p – n -переходом, включенного по схеме с общим истоком (ОИ).

Литература. [1]; [2]; [3]; [4]; [5]; [6].

I. Описание установки

Схема исследования полевого транзистора с p -каналом и p – n -переходом, включенного по схеме ОИ представлена на рис. 47. Величины питающих напряжений и пределы измерения приборов указаны на схеме. Изменение напряжений производится регуляторами блока питаний. Нагрузочный резистор R_c включается переключкой П.

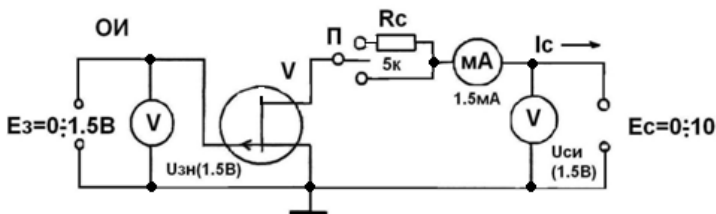


Рис. 47

II. Приборы и оборудование

1. Лабораторная панель.
2. Измерительные приборы М2007 или М1106 – 3 шт.
3. Лабораторный стабилизированный блок питания с регулировкой выходных напряжений: $0 \div 20$ В и $0 \div 3$ В.
4. Полевой транзистор с p -каналом и p – n -переходом.

III. Лабораторное задание

1. Получить указания преподавателя по выполнению лабораторного задания.

Предупреждение. Во избежание выхода из строя исследуемого транзистора **не допускается**:

- 1) Включение питающих напряжений неправильной полярности.
 - 2) Превышение (даже кратковременное) предельно допустимых напряжений на электродах транзистора.
2. Собрать схему исследования и предъявить преподавателю на проверку.
 3. Снять семейство статических стоковых (выходных) характеристик $I_c = f(U_{си})$ при нескольких значениях $U_{зи}$.

Значения $U_{зи}$ и величины $U_{си}$, при которых производится отсчет I_c , указаны в карточке-задании (стр. 96).

Результаты измерений поместить в таблицу 1 и построить на одном чертеже семейство стоковых характеристик.

Таблица 1

$I_c = f(U_{си})$ при $U_{зи} = const; U_{си}$				
$U_{си}$ (В)	I_c (мА)			
	При $U_{зи} = \dots В$	При $U_{зи} = \dots В$	При $U_{зи} = \dots В$	При $U_{зи} = \dots В$

4. В заданной рабочей точке (см. карточку-задание, стр. 96) определить статические параметры исследуемого транзистора: крутизну стокзатворной характеристики S , внутреннее сопротивление R_i и коэффициент усиления μ .
5. Снять статическую стокзатворную характеристику $I_c = f(U_{зи})$ при заданном $U_{си}$.

Результаты измерений поместить в таблицу 2 и построить характеристику.

Таблица 2

$I_c = f(U_{зи})$ при $U_{си} = const = \dots В$											
$U_{зи}, В$											
$I_c, мА$											

По построенной характеристике определить S и сравнить полученную величину с результатом п. 4.

6. Снять динамическую сток затворную характеристику $I_c = f(U_{зи})$ для заданного R_c и E_c . Результаты измерений поместить в таблицу 3 и на чертеже п. 5, построить динамическую характеристику.

Таблица 3

$I_c = f(U_{зи})$ при $R_c = \dots кОм$ и $E_c = \dots В$											
$U_{зи}, В$											
$I_c, мА$											

7. На графике семейства стоковых статических характеристик $I_c = f(U_{си})$, снятых в п. 3 построить динамическую стоковую характеристику (линию нагрузки) для заданных R_c и E_c .

На графике, полученном в результате выполнения п. 6, по данным линии нагрузки построить (другим цветом) для сравнения участок динамической стокзатворной характеристики.

8. В заданной рабочей точке (точке пересечения стоковой динамической и стоковой статической характеристик) определить графически и расчетным путем динамические параметры S_{∂} и μ_{∂} .

Результаты свести в таблицу 4.

Таблица 4

	$S_{\partial}, мА/В$	μ_{∂}
Графический метод		
Расчет по формулам		

IV. Содержание отчета

1. Основные электрические данные исследуемого транзистора (номинальные и предельно допустимые), цоколевка и условное обозначение на схемах.
2. Схема исследования.
3. Результаты измерений к пунктам 3, 5 и 6 лабораторного задания, построенные графики, построения и расчеты к пунктам 4, 5, 7 и 8.

V. Контрольные вопросы

1. Каковы возможные способы управления током в выходной цепи усилительных элементов?
2. Рассказать об устройстве и принципе работы полевого транзистора.
3. Чем отличается управление током стока полевого транзистора от управления током коллектора биполярного транзистора?
4. Назвать возможные схемы включения полевых транзисторов.
5. Перечислить статические характеристики и параметры полевых транзисторов.
6. Как определяются статические параметры полевых транзисторов?
7. В чем различие динамического и статического режимов усиленного элемента?
8. Почему с увеличением сопротивления нагрузки уменьшается крутизна динамической стокзатворной характеристики?
9. Как по заданным E_c и R_c построить динамическую стоковую характеристику (линию нагрузки)?
10. Объяснить порядок построения динамической стокзатворной характеристики по линии нагрузки.

11. Как определить динамические параметры полевого транзистора по характеристикам? Привести формулы для расчета динамических параметров по статическим.
12. Каковы преимущества и недостатки полевых транзисторов?

Приложение

Карточки задания к работам

(примерные)

Карточка-задание к работам № 1—2

6Н1П

ДВОЙНОЙ ТРИОД

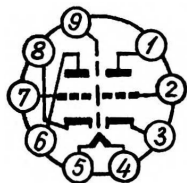


Рис. 48

Основное назначение — усиление напряжения НЧ.

Оформление — стеклянное миниатюрное.

Номинальные электрические данные
(для каждого триода)

$$U_{\text{н}} = 6,3 \text{ В} \quad U_a = 250 \text{ В} \quad U_{c1} = -5 \text{ В} \quad R_i = 11 \text{ к}$$

$$I_{\text{н}} = 0,6 \text{ А} \quad I_a = 8 \text{ мА} \quad S = 2,7 \text{ мА/В} \quad \mu = 35$$

Предельно допустимые данные

(для каждого триода)

$$U_{a \text{ макс}} = 300 \text{ В} \quad I_{a \text{ макс}} = 25 \text{ мА} \quad P_{a \text{ макс}} = 2 \text{ Вт}$$

Работа № 1. Задание к пунктам.

4. $U_a = 250; 200; 150 \text{ В};$

U_{c1} изменять от значения, при котором $I_a = 0$ до достижения $I_a = 25 \text{ мА};$

5. $U_{c1} = 0; -2; -4 \text{ В};$

U_a изменять от 0 до 250 В, на начальных участках через 10 В, на линейных — через 20 В.

Работа № 2. Задание к пунктам.

3 и 4. $R_a = 22 \text{ к}$ и $12 \text{ к}; E_a = 250 \text{ В};$

6. $R_a = 12 \text{ к}; U_{c1} = -2 \text{ В}.$

Карточка-задание к работе №3

6Ж8

ПЕНТОД С КОРОТКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

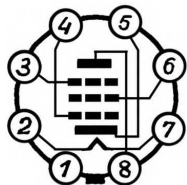


Рис. 49

Основное назначение — усиление НЧ, ВЧ и детектирование.

Оформление металлическое, цоколь — октальный.

Номинальные электрические данные

$$U_{\text{н}} = 6,3 \text{ В} \quad U_a = 250 \text{ В} \quad U_{c1} = -3 \text{ В} \quad U_{c2} = 100 \text{ В} \quad S = 1,65 \text{ мА/В}$$

$$I_{\text{н}} = 0,3 \text{ А} \quad I_a = 3 \text{ мА} \quad U_{c3} = 0 \text{ В} \quad I_{c2} = 0,8 \text{ мА} \quad R_i = 1000 \text{ к}$$

Предельно допустимые данные

$$U_{\text{н макс}} = 6,9 \text{ В} \quad U_{a \text{ макс}} = 330 \text{ В} \quad U_{c2 \text{ макс}} = 140 \text{ В}$$

$$U_{\text{н мин}} = 5,7 \text{ В} \quad P_{a \text{ макс}} = 2,8 \text{ Вт} \quad P_{c2 \text{ макс}} = 0,7 \text{ Вт}$$

Задание к пунктам.

4. $U_{c1} = 0$; $U_{c3} = 100 \text{ В}$;

U_a изменять от 0 до 30 В через 3 В, от 30 до 100 через 10 В, и далее до 250 В через 25 В.

5. $U_{c1} = -1$; -2 ; -3 В ; $U_{c2} = 100 \text{ В}$; $U_{c3} = 0$;

U_a изменять от 0 до 250 В. Измерения производить не менее чем в десяти точках;

6. $U_{c1} = -2 \text{ В}$; $U_a = 150 \text{ В}$;

7. $U_a = 150$; 200 В ; $U_{c2} = 80$; 120 В ;

U_{c1} изменять от запирающего до нуля.

8. 6П6С.

Карточка-задание к работе № 4

СТЗС

СТАБИЛИТРОН ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА

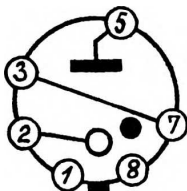


Рис. 50

Основное назначение — стабилизация напряжения.

Наполнение — аргон-неонгелиевая смесь.

Оформление — стеклянное с октальным цоколем.

Катод — холодный.

Электрические данные

$$U_{аз} \leq 127 \text{ В}$$

$$I_{ст \text{ мин}} = 5 \text{ мА}$$

$$U = 135 \div 210 \text{ В}$$

$$U_{ст} = 108 \pm 3,5 \text{ В}$$

$$I_{ст \text{ макс}} = 40 \text{ мА}$$

Задание к пунктам.

4. $R_6 = 2200 \text{ Ом}$;

$I_{ст}$ изменять через 5 мА;

5. $U = 150 \text{ В}$; $I_{н \text{ мин}} = 10 \text{ мА}$; $I_{н \text{ макс}} = 30 \text{ мА}$;

6. $R_{н} = 10 \text{ к}$;

U изменять через 10 В от 20 В до 0;

7. $R_{н \text{ макс}} = 10 \text{ к}$; $U = 200 \text{ В}$.

Измерения производить через каждые 3 мА изменения $I_{н}$.

Карточка-задание к работе № 6

ТГ1-0,1/0,3

ТИРАТРОН ДУГОВОГО РАЗРЯДА С НАКАЛИВАЕМЫМ КАТОДОМ

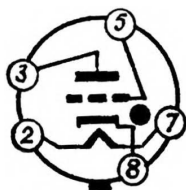


Рис. 51

Основное назначение — работа в релаксационных и выпрямительных устройствах.

Наполнение — аргон.

Оформление — стеклянное с октальным цоколем.

Электрические данные

$$U_{\text{н}} = 6,3 \text{ В} \quad I_{\text{а макс}} = 0,1 \text{ А} \quad U_{\text{ар}} \leq 20 \text{ В}$$

$$I_{\text{н}} = 0,66 \text{ А} \quad U_{\text{а макс}} = 300 \text{ В}$$

Задание к пунктам.

4. U_c изменять от -20 В до $+4 \text{ В}$ через $2 \div 5 \text{ В}$;

5. $U_a = 100$ и 140 В ; U_c изменять от -20 В до $+4 \text{ В}$.

Карточка-задание к работе № 5

MTX-90

ТИРАТРОН ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА С ХОЛОДНЫМ КАТОДОМ

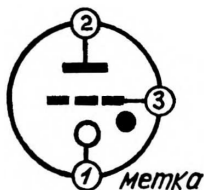


Рис. 52

Основное назначение — преобразование электрических сигналов малой мощности и применение в качестве ионного реле.

Наполнение — неон.

Оформление — стеклянное миниатюрное.

Номинальные электрические данные

$$U_{\text{ар}} = 50 \text{ В} \quad I_a = 7 \text{ мА} \quad I_c > 2 \text{ мкА}$$

$$U_{\text{а макс}} = 200 \text{ В при } U_c = 0 \quad U_c \leq 90 \text{ В}$$

Предельно допустимые данные

$$E_{\text{а макс}} = 300 \text{ В} \quad U_{\text{с макс}} = 100 \text{ В}$$

$$I_{\text{а макс}} = 15 \text{ мА} \quad I_{\text{с макс}} = 100 \text{ мкА}$$

Задание к пунктам.

3-6. Установить $I_c = 5 \div 10 \text{ мкА}$; пределы изменения $I_c 5 \div 100 \text{ мкА}$;

4. $I_a = 10 \div 15 \text{ мкА}$, ток уменьшать вначале через $1 \div 2 \text{ мА}$ (до 1 мА), затем через $0,2 \text{ мА}$;

5. $I_c = 50; 40; 35; 30; 25; 20; 15; 13; 11; 9; 7; 5; 3; 1; 0 \text{ мкА}$;

6. $I_c = 50, 10 \text{ и } 4 \text{ мкА}$; $R_a = 20 \text{ к}$.

Карточка-задание к работе № 7

Д2В

ДИОД ГЕРМАНИЕВЫЙ ТОЧЕЧНЫЙ

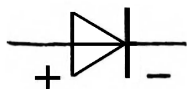


Рис. 53

Основное назначение — работа в схемах детектирования, АРУ, в счетных схемах и маломощных выпрямителях.

Оформление — металло-стеклянный корпус.
Вес — 1,3 г.

Номинальные электрические данные

$$\begin{array}{lll} I_{\text{пр}} \geq 9 \text{ мА} & \text{при } U_{\text{пр}} = 1 \text{ В} & C_{\partial} \leq 1 \text{ пФ} \\ I_{\text{обр}} \leq 250 \text{ мкА} & \text{при } U_{\text{обр}} = 30 \text{ В} & f_{\text{макс}} = 150 \text{ МГц} \end{array}$$

Предельно допустимые данные

$$I_{\text{пр макс}} = 25 \text{ мА} \quad U_{\text{обр макс}} = 40 \text{ В}$$

Карточка-задание к работе № 7

Д7Г

ДИОД ГЕРМАНИЕВЫЙ СПЛАВНОЙ

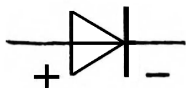


Рис. 54

Основное назначение — выпрямление переменного тока частотой до 20 кГц.

Оформление — металлический корпус.

Вес — 1,4 г.

Номинальные электрические данные

$$I_{\text{пр ср}} \leq 300 \text{ мА} \quad \text{при } U_{\text{пр}} = 0,5 \text{ В} \quad f_{\text{макс}} = 20 \text{ кГц}$$

$$I_{\text{обр}} = 0,1 \text{ мА} \quad \text{при } U_{\text{обр}} = 200 \text{ В}$$

Предельно допустимые данные

$$I_{\text{пр макс}} = 300 \text{ мА} \quad U_{\text{обр макс}} = 200 \text{ В}$$

Карточка-задание к работе № 7

Д 808

КРЕМНИЕВЫЙ СТАБИЛИТРОН

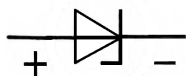


Рис. 55

Основное назначение — стабилизация напряжения.

Оформление — металлический корпус.

Вес — 1 г.

Номинальные электрические данные

$$U_{\text{ст}} = 7 \div 8,5 \text{ В} \quad U_{\text{пр}} = 1 \text{ В} \quad \text{при } I_{\text{пр}} \geq 50 \text{ мА}$$

Предельно допустимые данные

$$I_{\text{ст мин}} = 1 \text{ мА} \quad I_{\text{пр макс}} = 200 \text{ мА}$$

$$I_{\text{ст макс}} = 33 \text{ мА} \quad P_{\text{макс}} = 280 \text{ мВт}$$

Задание к пунктам.

5. $R_6 = 270 \text{ Ом};$

6. $R_{\text{н}} = 3,3 \text{ к};$

U изменять от 0 до 16 В через 2 В;

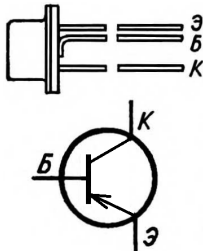
7. $R_{\text{н макс}} = 3,3 \text{ к}; U = 15 \text{ В}; I_{\text{н макс}} = 35 \text{ мА}.$

Измерения производить через 3 мА.

Карточка-задание к работе № 8А

П14

ГЕРМАНИЕВЫЙ СПЛАВНОЙ ТРАНЗИСТОР ТИПА $p - n - p$



Основное назначение — усиление и генерирование электрических сигналов до 2 МГц.

Оформление — герметичный металлический корпус.

Рис. 56

Номинальные электрические данные

$$\begin{aligned} f_{\alpha} &\leq 1 \text{ МГц} & I_{\text{кo}} &\leq 15 \text{ мкА} & h_{226} &= 3,3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \\ h_{21\text{э}} &= 20 \div 40 & I_{\text{эo}} &\leq 30 \text{ мкА} \end{aligned}$$

Предельно допустимые данные

$$\begin{aligned} I_{\text{к макс}} &= 20 \text{ мА} & U_{\text{кб макс}}(U_{\text{кэ макс}}) &= -15 \text{ В} \\ P_{\text{к макс}} &= 150 \text{ мВт} & t_{\text{раб}} &= -60^{\circ} \div 80^{\circ} \text{C} \end{aligned}$$

А. Схема ОБ. Задание к пунктам.

3. $U_{\text{кб}} = 0; -5; -10 \text{ В};$

$U_{\text{эб}}$ изменять от 0 В через 0,02 В до достижения $I_{\text{э макс}} = 15 \text{ мА}.$

4. $I_{\text{э}} = 5; 10; 15 \text{ мА};$

$U_{\text{кб}} = 0; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0$ и далее через 2 В до $U_{\text{кб макс}} = -15 \text{ В}.$

Б. Схема ОЭ. Задание к пунктам.

3. $U_{\text{кэ}} = 0; -3; -6 \text{ В};$

$U_{\text{бэ}}$ изменять от 0 В через 0,02 В до достижения $I_{\text{к}} = 15 \text{ мА}.$

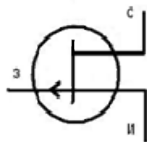
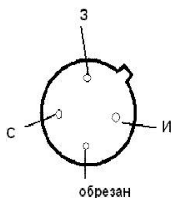
4. $I_{\text{б}} \approx 0,2; 0,4; 0,6 \text{ мА}$ (уточнить у преподавателя);

$U_{\text{кэ}} = 0; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2$ и далее через 2 В до $U_{\text{кэ макс}} = -15 \text{ В}.$

Карточка-задание к работе № 8Б

КП 103Б

ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР С p - n -ПЕРЕХОДОМ И p -КАНАЛОМ



Основное назначение — усиление и генерирование электрических сигналов до 0,5 МГц.

Оформление — герметичный металлостеклянный корпус.

Рис. 57 Номинальные электрические данные

Начальный ток стока при $U_{зи} = 0$; $I_c \geq 1$ мА

Крутизна характеристики $S = 1 \div 2$ мА/В

Внутреннее сопротивление $R_i = 50 \div 250$ кОм

Предельно допустимые данные

$U_{зс\ max} = 15$ В ("+" на затворе);

$U_{си\ max} = -10$ В

$P_{с\ max} = 120$ мВт

Задание к пунктам.

3. $U_{зи} = 0, 2; 0, 4; 0, 6; 0, 8$ В.

$U_{си} = 0; 0, 5; 1, 0; 2, 0; 4, 0; 6, 0; 8, 0; 10, 0$ В.

4. $U_{зи} = 0, 4$ В; $U_{си} = 8$ В.

5. $U_{си} = 10$ В, $U_{зи}$ изменять от нуля до $U_{зи\ отс}$ через 0,1 В.

6. $R_c = 5, 6$ кОм; $E_c = 10$ В; $U_{зи}$ изменять как указано в п. 5.

7. $R_c = 5, 6$ кОм; $E_c = 10$ В.

8. $U_{зи} = 0, 4$ В.

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ	2
Правила выполнения лабораторных работ	3
ЛИТЕРАТУРА	5
I. Электронные лампы	6
Характеристики и параметры электронных ламп	7
Статические характеристики	7
Динамические характеристики	10
Статические параметры	11
Динамические параметры	14
ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ	14
Работа № 1. Триод в статическом режиме	16
I. Оборудование и приборы	16
II. Лабораторное задание	16
III. Содержание отчета	18
IV. Контрольные вопросы	18
Работа № 2. Триод в динамическом режиме	19
I. Оборудование и приборы	19
II. Лабораторное задание	19
III. Содержание отчета	20
IV. Контрольные вопросы	21
Работа № 3. Тетрод и пентод	21
I. Оборудование и приборы	21
II. Лабораторное задание	22
III. Содержание отчета	24
IV. Контрольные вопросы	24

II. Ионные приборы	25
Вольтамперная характеристика газового разряда . . .	25
Ионные приборы тлеющего разряда	27
Газоразрядные стабилитроны	27
Тиратроны с холодным катодом	30
Тиратроны дугового разряда с накалимым катодом . .	33
Работа № 4. Стабилитрон тлеющего разряда	34
I. Схема исследования	35
II. Оборудование и приборы	35
III. Лабораторное задание	35
IV. Содержание отчета	37
V. Контрольные вопросы	37
Работа № 5. Тиратрон тлеющего разряда с холодным катодом	38
I. Схема исследования	38
II. Оборудование и приборы	38
III. Лабораторное задание	39
IV. Содержание отчета	40
V. Контрольные вопросы	40
Работа № 6. Тиратрон дугового разряда с накалимым катодом	41
I. Схема исследования	41
II. Оборудование и приборы	42
III. Лабораторное задание	42
IV. Содержание отчета	43
V. Контрольные вопросы	44
III. Полупроводниковые приборы	45
Проводимость полупроводников	46
$p-n$ переход	48
Полупроводниковые диоды	50
Общие сведения	50
Вольтамперные характеристики	51
Основные параметры диодов	52
Биполярные транзисторы	54
Принцип действия	54
Схемы включения транзисторов	56
Статические характеристики транзисторов . . .	57

Параметры транзисторов	61
Униполярные (полевые) транзисторы	64
Принцип действия	64
Полевой транзистор с $p-n$ -переходом	65
Статические характеристики и параметры	66
Динамические характеристики и параметры	68
Работа № 7. Полупроводниковые диоды	70
I. Описание установки	70
II. Оборудование и приборы	71
III. Лабораторное задание	71
IV. Содержание отчета	73
V. Контрольные вопросы	74
Работа № 8А. Биполярные транзисторы	74
I. Описание установки	75
II. Используемая аппаратура и оборудование	76
III. Лабораторное задание	76
IV. Содержание отчета	80
V. Контрольные вопросы	81
Работа № 8Б. Униполярные (полевые) транзисторы	82
I. Описание установки	82
II. Приборы и оборудование	82
III. Лабораторное задание	83
IV. Содержание отчета	85
V. Контрольные вопросы	85
Приложение. Карточки задания к работам	87
Карточка-задание к работам № 1—2	87
Карточка-задание к работе № 3	88
Карточка-задание к работе № 4	89
Карточка-задание к работе № 6	90
Карточка-задание к работе № 5	91
Карточка-задание к работе № 7	92
Карточка-задание к работе № 7	93
Карточка-задание к работе № 7	94
Карточка-задание к работе № 8А	95
Карточка-задание к работе № 8Б	96