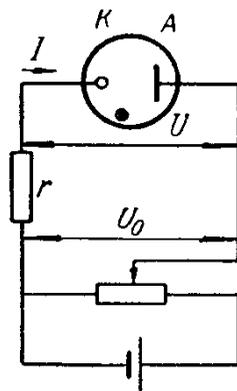


ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»

Кафедра полупроводниковой электроники и нанoeлектроники

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине
«Физические основы электроники»
для студентов направления подготовки бакалавров
11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника», профиля
«Микроэлектроника и твердотельная электроника»
очной формы обучения
Часть 1



Воронеж 2016

Составитель канд. техн. наук Т.В. Свистова

УДК 621.382.2

Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Физические основы электроники» для студентов направления подготовки бакалавров 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», профиля «Микроэлектроника и твердотельная электроника» очной формы обучения. Ч. 1 / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. Т.В. Свистова. Воронеж, 2016. 36 с.

Методические указания содержат лабораторные работы, позволяющие ознакомиться с физическими принципами действия и рабочими характеристиками электровакуумных и газоразрядных приборов (диодов, триодов, тиратронов). Методические указания предназначены для студентов - бакалавров третьего курса

Издание подготовлено в электронном виде и содержится в файле «Му лр ФОЭ ч1.pdf».

Табл. 6. Ил. 14. Библиогр.: 9 назв.

Рецензент канд. техн. наук, доц. Н.Н. Кошелева

Ответственный за выпуск зав. кафедрой
д-р физ.-мат. наук, проф. С.И. Рембеза

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет», 2016

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум по дисциплине «Физические основы электроника» (часть 1) предназначен для освоения студентами методик измерения параметров и характеристик электровакуумных приборов, используемых для расчета режимов и выявления влияния внешних воздействий на работу приборов.

Электроника – область науки и техники, которая занимается изучением электронных и ионных явлений в различных средах и на их границах. Основное место в электронике занимают электронные приборы. В электронных приборах используются вещества во всех четырех агрегатных состояниях – твердые тела, жидкости, газы и плазма. Применяются различные типы электромагнитных взаимодействий, постоянные и переменные электрические и магнитные поля различных конфигураций, в которых движутся потоки заряженных частиц. Основными направлениями развития электроники являются: вакуумная и твердотельная электроника.

Вакуумная и плазменная электроника – это раздел электроники, включающий исследования взаимодействия потоков свободных электронов/ионов с электрическими и магнитными полями в вакууме/газе, а также методы создания электронных приборов и устройств, в которых это взаимодействие используется.

К важнейшим направлениям исследований в области вакуумной и плазменной электроники относятся: электронная эмиссия (в частности, термоэлектронная и фотоэлектронная эмиссия); формирование потока электронов и/или ионов и управление этими потоками; формирование электромагнитных полей с помощью устройств ввода и вывода энергии; элементарные процессы в ионизованном газе и плазме и др.

Основные направления развития вакуумной и плазменной электроники связаны с созданием электровакуумных приборов.

Электрoвакуумными называются приборы, действие которых основано на использовании электронных или ионных процессов, протекающих в высоком вакууме или в разреженном газе. Они делятся на две основные группы:

а) *вакуумные электронные приборы*, процессы в которых протекают в высоком вакууме (давление остаточных газов обычно не превышает 10^{-4} Па), где движение электронов проходит практически без столкновения с атомами газа. К вакуумным электронным приборам принадлежат: электронно-управляемые лампы (диоды, триоды, тетроды и др.); электронно-лучевые приборы (осциллографические трубки, кинескопы и др.); фотоэлектронные приборы (вакуумные фотоэлементы, фотоэлектронные умножители и др.); электрoвакуумные СВЧ приборы (магнетроны, клистроны и др.).

б) *ионные*, или *газоразрядные*, приборы, в которых электрический разряд протекает в газе, где столкновение электронов с атомами газа играют решающую роль. Давление используемого газа (чаще всего используются инертные газы или водород), как правило, значительно ниже атмосферного. Другими словами, это приборы, действие которых основано на прохождении электрического тока через разреженный газ (явление газового разряда). Иногда приборы наполняют парами металла, например ртути. К ионным приборам относятся неоновые лампы, знаковые индикаторы, искровые разрядники, газотроны, тиратроны.

Следует отметить, что за последние годы прогресс в области полупроводниковой электроники позволил во многих случаях заменить электрoвакуумные приборы полупроводниковыми. Однако в ряде случаев электронные лампы не могут быть заменены полупроводниковыми приборами из-за меньшего температурного диапазона, меньшей стабильности, меньшего входного сопротивления и т. п. А осциллографические и рентгеновские трубки, кинескопы практически не имеют полупроводниковых аналогов.

ОРГАНИЗАЦИЯ И ПРОВЕДЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Объем каждой лабораторной работы можно выполнить в отведенное время только при условии предварительной подготовки, в процессе которой студенты должны:

а) изучить теоретический материал по лабораторной работе, пользуясь методическими указаниями и литературой, приведенной в них;

б) уяснить цель работы и порядок ее выполнения;

в) выяснить порядок включения и основные правила работы измерительных приборов;

г) изучить методику выполнения измерений и проведения вычислений.

Лабораторные работы выполняют с соблюдением следующих требований:

1. На одном рабочем месте допускается к работе не более 2 – 3 студентов. Каждый член бригады должен вести рабочую тетрадь.

2. Перед проведением лабораторной работы преподаватель проверяет степень готовности студентов к выполнению работы.

3. Сборку схемы студенты выполняют самостоятельно; правильность соединений элементов схемы проверяет преподаватель до включения схемы. Студенты не имеют права включать схему без проверки ее преподавателем.

4. Первоначальное включение схемы и измерительных приборов под напряжение производится только в присутствии преподавателя или лаборанта.

5. После проведения измерений сделать оценочные расчеты величин или построить предварительные графики, отражающие ход зависимостей, и показать преподавателю. Измерительную схему при этом не выключать! При необходимости по указанию преподавателя провести измерения заново.

6. После выполнения работы выключить приборы из сети, схему соединений разобрать, навести порядок на рабочем месте и доложить об этом лаборанту.

При работе в лаборатории студенты должны:

строго соблюдать установленные правила внутреннего распорядка и техники безопасности;

бережно обращаться с оборудованием и измерительными приборами;

соблюдать следующие правила обращения с измерительными приборами:

а) при включении в схему приборов постоянного тока следить за полярностью включения;

б) до включения напряжения коммутирующее устройство и ручки управления прибора установить в нужное положение согласно инструкции;

в) после включения напряжения необходимо выдержать установленную для данного типа прибора норму времени прогрева прибора согласно инструкции;

сообщить преподавателю или лаборанту о неисправностях оборудования или измерительных приборов.

Отчет о проделанной работе составляется каждым студентом самостоятельно. Отчет должен содержать:

наименование, цель работы и используемое оборудование;

методику измерений в данной лабораторной работе;

краткие сведения об объектах измерения;

результаты измерений и расчетов (таблицы, графики, осциллограммы);

краткие выводы и заключения.

Исследование работы электронных приборов неизбежно связано с применением повышенных напряжений. Поражение током при этих напряжениях может привести к тяжелым последствиям. Поэтому при выполнении лабораторных работ

необходимо соблюдать следующие правила техники безопасности:

1. Перед началом работ следует ознакомиться с источниками электропитания, способами их включения, эксплуатации и выключения.

2. При сборке схемы все имеющиеся реостаты, автотрансформаторы и потенциометры устанавливаются в положения, указанные в описании к работе.

3. Сборку схемы необходимо производить соединительными проводами с исправной изоляцией.

4. После окончания сборки схемы преподаватель или лаборант должен ее проверить и разрешить включить источники питания.

5. Запрещается включать в схему измерительные приборы, корпуса которых не заземлены; место расположения клеммы « \perp » указывается в техническом описании к приборам.

6. Запрещается прикасаться руками к зажимам, находящимся под напряжением; наличие напряжения на зажимах приборов следует проверять только измерительным прибором.

7. Все изменения в схеме, а также устранения неисправностей следует производить после отключения схемы.

8. Запрещается оставлять без наблюдения схему и измерительные приборы, подключенные к источнику питающего напряжения.

9. Разбирать схему по завершении работы следует только после отключения источников питания и с разрешения преподавателя.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ОСНОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОВАКУУМНОГО ДИОДА

Цель работы: ознакомление с физическими основами работы электровакуумного диода, его характеристиками и параметрами.

Используемое оборудование и материалы: универсальный источник питания УИП–2, стенд для измерения характеристик электровакуумных приборов, диод 2Д2С с катодом прямого накала.

Теоретическая часть

Диод – это двухэлектродная вакуумная лампа, основным свойством которой является односторонняя проводимость тока. Ток возникает только при положительном потенциале на аноде относительно катода. При этом электроны эмиттируемые катодом, движутся к аноду, создавая анодный ток. При обратной полярности анодный ток практически равен нулю, так как электрическое поле между анодом и катодом противодействует попаданию электронов на анод. Схематическое изображение диода приведено на рис. 1.1.

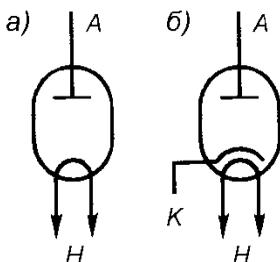


Рис. 1.1. Схематическое изображение диода прямого накала (а) и косвенного накала (б): А – анод, К – катод, Н – накал

График зависимости тока анода от напряжения на аноде $I_a = f(U_a)$ при постоянной температуре катода называется **вольт-амперной характеристикой диода** (ВАХ), рис. 1.2. При малых значениях U_a происходит медленный прирост анодного тока (участок ОА на рис. 1.2.), так как электронное облако вокруг катода создает поле, противодействующее полю анодного напряжения. С ростом U_a действие объемного заряда ослабляется, и ток I_a растет быстрее. На участке ОБ характеристика подчиняется закону «три вторых», т.е.

$$I_a = kU_a^{3/2}, \quad (1.1)$$

где k – коэффициент, зависящий от геометрических размеров и материалов катода).

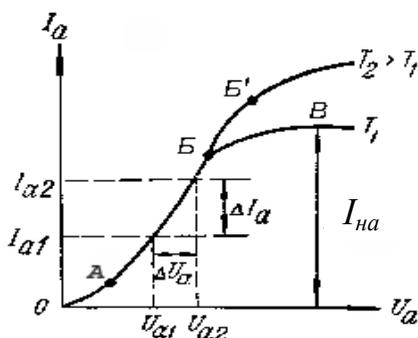


Рис. 1.2. Вольт-амперные характеристики диода

При дальнейшем увеличении U_a (участок BB) закон «трех вторых» нарушается, ток I_a растет все медленнее и стремится к определенному значению, называемому **током насыщения** $I_{нас}$ и равному току эмиссии. $I_{нас}$ уже не зависит от увеличения значения U_a , так как все электроны, испускаемые катодом, доходят до анода. Увеличить ток насыщения можно

только путем увеличения температуры катода. При $T_2 > T_1$ получим $I_{\text{нас } T_2} > I_{\text{нас } T_1}$.

Режим, при котором анодный ток меньше тока насыщения, т.е. $I_a < I_{\text{нас}}$, называется **режимом ограничения**. Диоды обычно работают в режиме ограничения при $U_a = 10 - 30$ В. Режимом насыщения пользуются редко.

Параметрами диода являются: **внутреннее сопротивление переменному** R_i (называемое также внутренним дифференциальным сопротивлением) и **постоянному** R_o току и **внутренняя дифференциальная проводимость** диода S (называется также его крутизной). Параметры диода определяются по следующим формулам:

$$R_i = \lim_{\Delta I_a \rightarrow 0} \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{dU_a}{dI_a}, [\text{Ом}]; \quad (1.2)$$

$$R_o = \frac{U_a}{I_a} = \frac{U_a}{kU_a^{3/2}} = \frac{1}{kU_a^{1/2}}, [\text{Ом}]; \quad (1.3)$$

$$S = \lim_{\Delta U_a \rightarrow 0} \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a} = \frac{dI_a}{dU_a} = \frac{1}{R_i}, [\text{мА/В}], \quad (1.4)$$

откуда $R_i = 1/S$. По формуле (1.4) путем дифференцирования значения тока I_a (1.1) по dU_a находим, что $S = 3/2 \cdot k \cdot U_a^{1/2}$. С учетом найденного значения S , формулу (1.1) можно представить в виде:

$$I_a = 2/3 (3/2kU_a^{1/2})U_a = 2/3SU_a \quad (1.5)$$

На рис. 1.2 показано, как по ВАХ диода можно приближенно найти значения R_i , S . Значение R_o находится в некоторой рабочей точке в середине линейного участка АБ (рис. 1.2).

У реальных диодов внутреннее дифференциальное сопротивление лежит в пределах 20 – 10000 Ом. При нормаль-

ном напряжении накала крутизна обычно составляет 2 – 10 мА/В.

Параметрами диодов являются также:

максимально допустимое обратное напряжение на аноде $U_{\text{обр макс}}$ – наибольшее обратное напряжение между анодом и катодом, при котором диод может работать без пробоя. В современных диодах эта величина достигает неполных десятков киловольт;

максимально допустимый прямой ток анода $I_{\text{а макс}}$ – наибольший прямой ток, при котором диод сохраняет работоспособность в течение гарантированного срока, составляющий от нескольких десятков микроампер для маломощных высоковольтных диодов до нескольких сотен миллиампер для мощных диодов;

максимально допустимая мощность $P_{\text{а макс}}$, рассеиваемая на аноде – наибольшая мощность, которую анод может рассеивать без разрушения из-за перегрева. Для мощных выпрямительных диодов эта мощность достигает нескольких десятков ватт.

Электрическая мощность рассеиваемая на аноде, определяется по формуле

$$P_a = U_a I_a. \quad (1.6)$$

При выпрямлении переменного тока напряжение и ток анода изменяются за период времени T , поэтому мощность рассеивания можно определить как

$$P_a = \frac{1}{T} \int_0^T u_a(t) i_a(t) dt, \quad (1.7)$$

где $u_a(t)$ и $i_a(t)$ – мгновенные значения напряжения и тока диода.

К параметрам лампы относятся также номинальное напряжение и ток накала. Кроме того, зачастую указывается

еще наибольшее допустимое обратное напряжение $U_{обр}$, которое может быть приложено к лампе в непроводящем направлении, не подвергая ее опасности пробоя.

Диоды применяют для выпрямления переменного тока низкой частоты (такие диоды называются обычно кенотронами) и для преобразования высокочастотных колебаний (высокочастотные диоды для детектирования, модулирования сигналов и преобразования частот).

Схема исследования, необходимые приборы

Схема исследования диода приведена на рис. 1.3. Основные параметры некоторых диодов приведены в табл. 1.1, а исследуемого диода – в табл. 1.2.

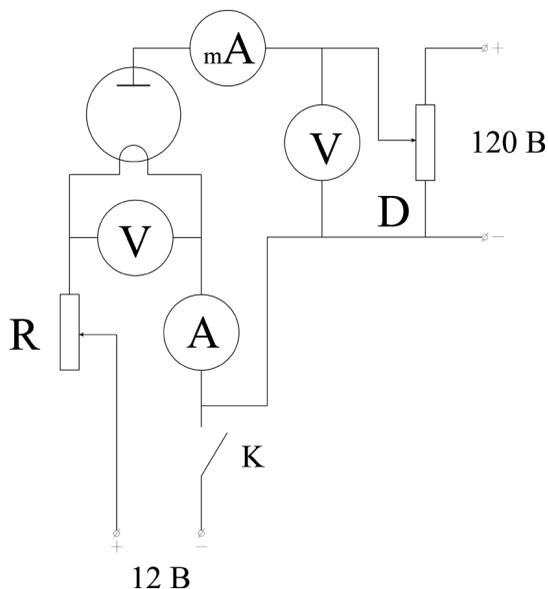


Рис. 1.3. Схема исследования диода с катодом прямого накала

Таблица 1.1

Основные параметры выпрямительных диодов

Обозначение лампы	Количество анодов	Накал		Среднее значение выпрямленного тока, мА	Амплитуда обратного напряжения, В	Среднее внутреннее сопротивление на один анод, Ом
		U_n , В	I_n , А			
5Ц3С	2	5	3	250	1700	200
6Ц5С	2	6,3	0,6	75	1110	250

Таблица 1.2

Основные электрические параметры диода 2Д2С

Параметр	Величина
Номинальное напряжение накала U_n , В	2
Номинальный ток накала I_n , А	1,4
Максимально допустимое напряжение анода $U_{\text{макс}}$, В	120
Максимально допустимый анодный ток $I_{\text{а макс}}$, мА	20
Максимально допустимая мощность, выделяемая на аноде $P_{\text{а макс}}$, Вт	2,4

Цолевка диодов показана на рис. 1.4. Для большинства диодов цепь накала питается переменным током от источника переменного напряжения 5,5 – 7 В. Анодная цепь при снятии характеристик питается от источника постоянного напряжения УИП –2.

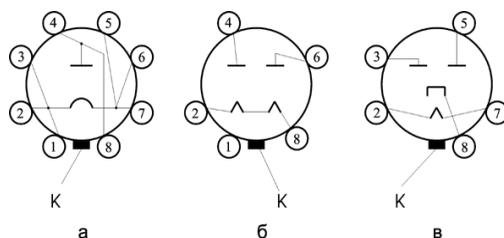


Рис. 1.4. Цоколевка диодов: а – диод с катодом прямого накала 2Д2С: К – ключ, 1, 2, 3, 5, 6, 7 – катод (нить накала); 4, 8 – анод; б – диод с катодом прямого накала 5Ц3С: К – ключ, 2, 8 – катод (нить накала); 4, 6 – анод; диод с подогреваемым катодом 6Ц5С: 2, 7 – подогреватель, 3, 5 – анод, 8 – катод

Порядок выполнения работы

1. Записать паспортные данные и зарисовать цоколевку исследуемой электронной лампы

2. Снятие анодных $I_a = f(U_a)$ при $U_n = \text{const}$ и эмиссионных $I_a = f(U_n)$ при $U_a = \text{const}$ характеристик. Анодные характеристики снимают для пяти различных напряжений накала, которые в процессе каждого наблюдения поддерживают постоянными. Рекомендуется напряжение накала U_n задавать в интервале 0,7 – 1,1 В. Анодное напряжение изменять от 0 до 100 – 120 В через 10 – 20 В.

Измерения проводят следующим образом:

2.1. На стенде для измерения характеристик электровакуумных приборов выбирают тип исследуемой лампы, устанавливая переключатель «Тип лампы» в положение «Д» (диод)

2.2. Задают напряжение накала катода. Для этого переключатель «Тип электрода» устанавливают в положение «НД» (накал диода). Переключатель «Ток – напряжение» – в положение $U_{\text{макс}} = 20,00$ В. Рукояткой «Накал диода» на источнике питания УИП-2 задают напряжение накала $U_n = 0,7$ В, фиксируя его на измерительном приборе стенда. Изменяя положение

ние переключателя «Ток – напряжение» в положение «Ток», фиксируют ток накала, соответствующий установленному напряжению накала, согласно пределам измерения тока, указанным на стенде.

2.3. Не меняя напряжение и ток накала катода, подают напряжение на анод диода. Для этого переключатель «Тип электрода» устанавливают в положение «А» (анод), переключатель «Ток – напряжение» – в положение $U_{\text{макс}} = 200,0 \text{ В}$. Далее рукояткой «Напряжение анода» на источнике питания УИП-2 изменяют напряжение на аноде в интервале 10 – 120 В, фиксируя его на измерительном приборе стенда, и, меняя положение переключателя «Ток – напряжение» на «Ток», измеряют соответствующий этому анодному напряжению ток, учитывая пределы измерения тока, указанные на стенде.

2.4. Результаты измерений заносят в табл. 1.3.

Заполняют одну строку в табл. 1.3, повторяют измерения, начиная с пункта 2.2, при другом напряжении накала.

Таблица 1.3

Результаты измерений анодных характеристик диода
Тип лампы

$U_n, \text{ В}$	$I_n, \text{ А}$	$I_a, \text{ мА}$				
		$U_{a1}, \text{ В}$	$U_{a2}, \text{ В}$	$U_{a3}, \text{ В}$...	$U_{an}, \text{ В}$

3. Построение графиков характеристик

На основании результатов наблюдений, записанных в табл. 1.3, построить график анодных и эмиссионных характеристик исследуемого диода. Анодные характеристики строят для 4 – 5 напряжений U_n . Эмиссионные характеристики строят для трех напряжений U_a : $U_{a1} = 20 - 30 \text{ В}$; $U_{a2} = 50 \text{ В}$; $U_{a3} = 100 \text{ В}$. На графиках $I_a = f(U_a)$ для различных напряжений накала определяют значение крутизны анодной характеристики S и внутреннее сопротивление переменному току R_i , сопро-

тивление диода постоянному току R_0 по формулам (1.2 – 1.4). По данным табл. 1.3 для нескольких значений напряжений U_n и U_a определить эффективность катода H по формуле $H = I_{k \text{ макс}} / (U_n I_n)$, где $I_{k \text{ макс}}$ принять равным анодному току насыщения диода.

Содержание отчета

Отчет о проделанной работе должен содержать:

1. Точное наименование и цель работы.
2. Таблицу основных (паспортных) данных исследуемого диода и схему его цоколевки.
3. Схему для снятия характеристик диода с краткой характеристикой входящих в нее элементов.
4. Таблицу наблюдений.
5. Графики $I_a = f(U_a)$ при $U_n = \text{const}$
6. Графики $I_a = f(U_n)$ при $U_a = \text{const}$
7. Расчет параметров S , R_i , R_0 и H .
8. Краткие выводы.

Контрольные вопросы

1. Дайте понятие работы и потенциала выхода.
2. Что такое электронная эмиссия? Какие виды эмиссии Вы знаете?
3. Расскажите о конструкции и электродах электровакуумных ламп.
4. Какие катоды применяются в электронных лампах?
5. Какую функцию анод выполняет в электронной лампе?
6. Для чего применяются сетки в электронных лампах?
7. Расскажите о диоде и о его вольт-амперной характеристике.
8. Какие параметры диодов Вы знаете?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ОСНОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОВАКУУМНОГО ТРИОДА

Цель работы: ознакомление с физическими основами работы электровакуумного триода, его характеристиками и параметрами.

Используемое оборудование и материалы: универсальный источник питания УИП–2, стенд для измерения характеристик электровакуумных приборов, источник питания постоянного тока Б5-49, триод 6НЗП.

Теоретическая часть

Триодом называют электронную лампу, в которой помимо анода и катода имеется третий электрод – сетка, управляющая потоком электронов, т.е. током лампы. Управляющая сетка располагается между анодом и катодом вблизи последнего. Схематическое изображение триода приведено на рис. 2.1.

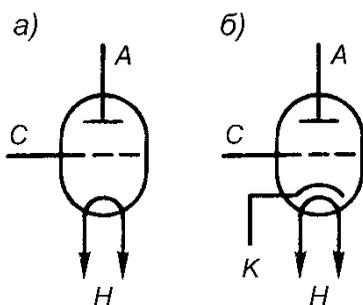


Рис. 2.1. Схематическое изображение триода с катодом прямого накала (а) и с катодом косвенного накала (б): А – анод, С – сетка, Н – подогреватель катода, К – катод

Разность потенциалов между сеткой и катодом называется **сеточным напряжением**. При сеточном напряжении, равном нулю ($U_c = 0$), ток лампы определяется напряжением на аноде. При положительном напряжении на сетке ($U_c > 0$) электрическое поле будет ускорять электроны, эмиттированные катодом, что вызовет увеличение анодного тока при том же анодном напряжении. Таким образом, изменяя напряжение на сетке, управляют величиной тока в анодной цепи.

Однако при $U_c > 0$ часть эмиттированных электронов попадает на сетку, что приводит к возникновению сеточного тока I_c , который иногда оказывает отрицательное влияние на режим работы лампы, вызывая искажение формы анодного тока. При нормальной работе триода сеточный ток должен быть ничтожно мал (порядка $0,1 - 0,001$ нА).

Если на сетке лампы будет отрицательный потенциал ($U_c < 0$), то на ускоряющее поле, созданное анодным напряжением, будет накладываться между сеткой и катодом тормозящее поле, уменьшая при этом анодный ток лампы. При некотором отрицательном напряжении сетки, называемом **запирающим** U_z , результирующее поле между сеткой и катодом становится тормозящим, анодный ток при этом становится равным нулю, т.е. лампа запирается.

Зависимость анодного тока от напряжения на сетке при постоянном напряжении на аноде, т.е. $I_a = f(U_c)$ при $U_a = \text{const}$, называется **статической анодно-сеточной характеристикой**, а зависимость анодного тока от напряжения на аноде при постоянном напряжении на сетке, т.е. $I_a = f(U_a)$ при $U_c = \text{const}$, – **статической анодной характеристикой**.

Статическими эти характеристики называются потому, что при их снятии все напряжения, кроме исследуемых, должны поддерживаться постоянными. Из рис. 2.2 видно, что при нулевом потенциале на сетке и заданном анодном напряжении U_{a2} в анодной цепи потечет ток I_{a2} . С увеличением отрицательного потенциала на сетке при том же U_{a2} анодный ток

уменьшится. На рис. 2.2 показаны запирающие напряжения U_{31} , U_{32} , U_{33} , когда ток анода равен нулю, для различных анодных напряжений. Увеличение или уменьшение анодного напряжения сдвигает характеристику соответственно влево или вправо относительно первоначальной.

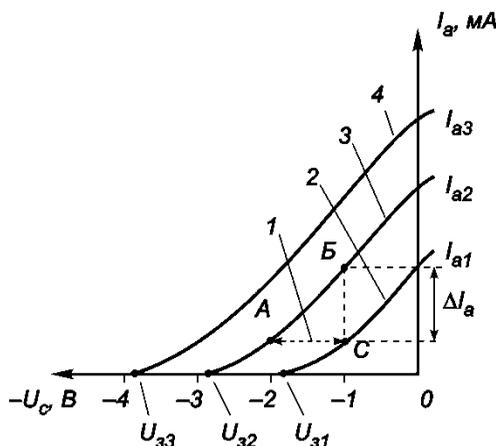


Рис. 2.2. Семейство анодно-сеточных характеристик триода:
 1 – ΔU_c ; 2 – U_{a1} ; 3 – U_{a2} ; 4 – $U_{a3} > U_{a2}$

На рис. 2.3 представлено семейство анодных характеристик, снятых при различных напряжениях на сетке. При $U_c = 0$ характеристика триода подобна характеристике диода. При увеличении отрицательного напряжения на сетке характеристики сдвигаются вправо. При приложении к сетке положительного напряжения характеристики сдвигаются влево. При этом в сеточной цепи появляются сеточные токи I_c , возникающие за счет перераспределения тока эмиссии между анодом и сеткой.

С помощью статических характеристик выбирается режим работы триода и определяются его параметры, характеризующие зависимость анодного и сеточного токов от анод-

ного и сеточного напряжений. К ним относятся: крутизна характеристики, внутреннее сопротивление и коэффициент усиления.

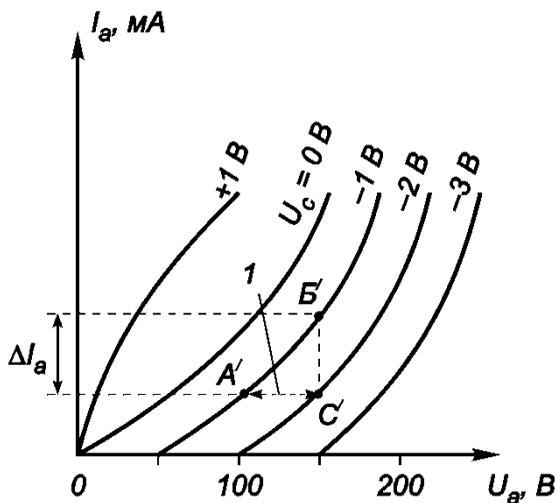


Рис. 2.3. Семейство анодных характеристик триода: 1 – ΔU_a

Так как в статическом режиме анодный ток является функцией двух напряжений: на аноде U_a и на сетке U_c , т.е. $I_a = f(U_a, U_c)$, то изменение анодного тока можно выразить полным дифференциалом

$$dI_a = \frac{\partial I_a}{\partial U_c} dU_c + \frac{\partial I_a}{\partial U_a} dU_a. \quad (2.1)$$

Частная производная $\partial I_a / \partial U_c$ при постоянном напряжении на аноде ($U_a = \text{const}$) называется **крутизной характеристики** и обозначается буквой S

$$S = \left. \frac{\partial I_a}{\partial U_c} \right|_{U_a = \text{const}} \quad (2.2)$$

Величина S зависит от расположения электродов и их размеров и колеблется от единиц до десятков миллиампер на вольт.

Частная производная $\partial I_a / \partial U_a$ при постоянном напряжении на сетке ($U_c = \text{const}$) называется **внутренней проводимостью триода** и характеризует влияние изменения напряжения на аноде на ток анода. Величина, обратная проводимости, называется **внутренним сопротивлением триода** переменному току (дифференциальное сопротивление триода)

$$R_i = \left. \frac{\partial U_a}{\partial I_a} \right|_{U_c = \text{const}} \quad (2.3)$$

Величина R_i зависит от размеров электродов и колеблется от сотен Ом до десятков кОм. Сопротивление триода постоянному току $R_o = U_a / I_a$ может заметно отличаться от R_i .

Поскольку в статическом режиме $dI_a = 0$, то уравнение (2.1) можно записать как

$$\frac{dU_a}{dU_c} = - \frac{\partial I_a}{\partial U_c} \cdot \frac{\partial U_a}{\partial I_a} = -SR_i, \quad (2.4)$$

отношение dU_a / dU_c называется **коэффициентом усиления триода**, обозначается буквой μ и равно

$$\mu = \left. \frac{dU_a}{dU_c} \right|_{I_a = \text{const}} = SR_i. \quad (2.5)$$

Так как сетка находится ближе к катоду, то действие сеточного напряжения на электронный поток оказывается силь-

нее, чем действие анодного напряжения, и значения μ будет больше единицы. В зависимости от расположения электродов величина μ колеблется от 4 до 100.

Величина, обратная μ , называется *проницаемостью*

$$D = \frac{1}{\mu}. \quad (2.6)$$

Соотношение (5.5) связывает все три параметра триода и получило название *уравнение параметров лампы*.

$$SR_i = \mu, \quad (2.7)$$

а с учетом формулы (5.6) выражение (5.7) принимает вид

$$DSR_i = 1. \quad (2.8)$$

Эти уравнения позволяют по двум известным параметрам определить третий, неизвестный.

Параметры триода можно определить по статическим характеристикам с помощью так называемого *характеристического треугольника* (АВС на рис. 2.2 и А'В'С' на рис. 2.3), построенного на средней части характеристики. По рис. 2.2 определяется значение $S = \Delta I_a / \Delta U_c$, а по рис. 2.3 – значение $R_i = \Delta U_a / \Delta I_a$.

Со всеми введенными обозначениями параметров лампы уравнение (2.1) можно записать как

$$dI_a = SdU_c + \frac{1}{R_i} dU_a \quad (2.9)$$

или

$$dI_a = \frac{1}{R_i} (\mu dU_c + dU_a). \quad (2.10)$$

Уравнение (2.10) называется **основным уравнением триода** и показывает влияние приращения анодного и сеточного напряжения на приращение анодного тока. Это уравнение используется при анализе работы любых ламповых схем.

В триоде находится три металлических электрода, между которыми существуют емкости: сетка–катод, анод–катод и анод–сетка. Эти емкости зависят от размеров и формы электродов, расстояния между ними и других показателей. Обычно эти емкости малы и составляют от 2 пФ для маломощных триодов; до 200 пФ для мощных.

Емкость сетка–катод $C_{ск}$ – входная емкость, является дополнительной нагрузкой источника входного сигнала.

Емкость анод–сетка $C_{ас}$ – проходная емкость приводит к падению напряжения на внутреннем сопротивлении источника входного напряжения и уменьшает напряжение на входе триода.

Отрицательное влияние проходной емкости $C_{ас}$ заключается в том, что выходное напряжение воздействует на вход лампы посредством ответвления тока из анодной цепи в цепь сетки. Поэтому любое изменение анодного напряжения через емкость $C_{ас}$ воздействует на цепь сетки и может исказить усиливаемые сигналы и вызвать самовозбуждение усилителя.

Емкость анод–катод $C_{ак}$ – выходная емкость триода, которая, шунтируя нагрузку усилительного каскада, снижает усиление.

Конструкция и значение параметров современных триодов чрезвычайно разнообразны и определяются главным образом их назначением. Триоды используются в различной радиоэлектронной аппаратуре на частотах до 10 ГГц в основном для генерирования электрических колебаний, усиления напряжения и мощности, а также для детектирования.

Недостатком триода является малый коэффициент усиления. Для его повышения можно увеличить частоту намотки управляющей сетки, но при этом уменьшится запирающее

напряжение, и анодно-сеточная характеристика смещается вправо, где работа усилительной лампы становится затруднительной из-за возрастания сеточного тока. Кроме того, в триоде относительно велика проходная емкость C_{ac} , ухудшающая работу усилителя.

Схема исследований, необходимые приборы

Схема исследования триода приведена на рис. 2.4. Основные параметры некоторых триодов приведены в табл. 2.1, а их цоколевки показаны на рис. 2.5.

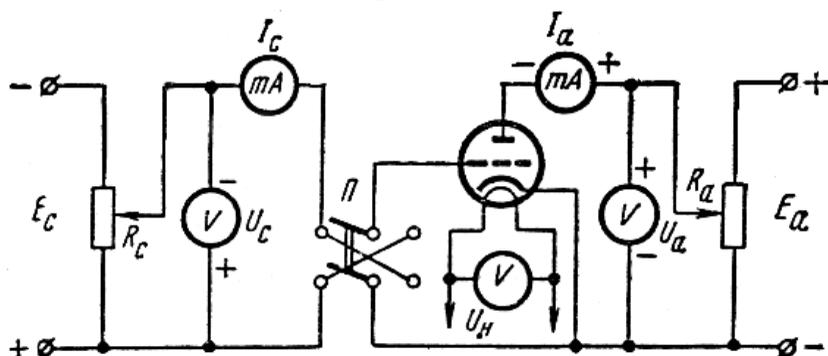


Рис. 2.4. Схема исследования триода

Таблица 2.1

Основные параметры триодов

Обозначение лампы	Накал		Анод		Параметры		
	$U_n, В$	$I_n, А$	$U_a, В$	$I_a, мА$	μ	$S, мА/В$	$R_i, Ом$
6НЗП	6,3	0,35	150	8,5	37	5,9	6250
6С2С	6,3	0,3	250	9	20,5	2,55	8050
6Н15П	6,3	0,45	100	9	38	5,6	6800

В схему исследования триода входят три источника напряжения: накала, анода, управляющей сетки. Напряжения питания накала и анода могут быть получены от блока питания типа УИП-2, сетки от источника питания постоянного тока Б5-49.

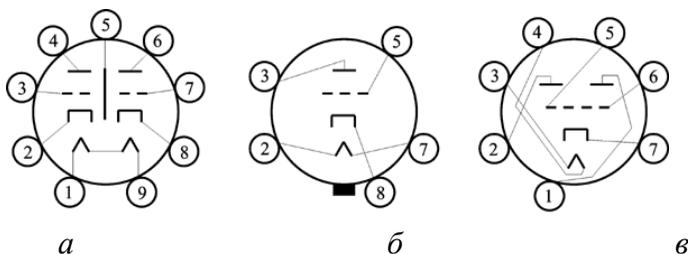


Рис. 2.5. Цоколевка триодов: а – двойной триод 6НЗП: 1, 9 – подогреватель катода, 2 – катод первого триода, 3 – сетка первого триода, 4 – анод первого триода, 5 – экран, 6 – анод второго триода, 7 – сетка второго триода, 8 – катод второго триода; б – триод 6С2С: 2, 7 – подогреватель катода, 3 – анод, 5 – сетка, 8 – катод; в – триод 6Н15П: 1, 2 – аноды, 5, 6 – сетка, 3, 4 – подогреватель катода, 7 – катод

Порядок выполнения работы

1. Записать паспортные данные и зарисовать цоколевку исследуемого триода.

2. Снятие статических анодных и анодно-сеточных характеристик.

Характеристики снимают при номинальном для данной лампы напряжении накала $U_n = 6,3$ В. Это напряжение подается на лампу от источника питания УИП-2.

Измерения производят следующим образом. Переключатель «Тип лампы» стенда устанавливают в положение «Тр» (триод). Напряжение на сетку подается от источника питания постоянного тока Б5-49, на котором необходимо задать следующий режим: напряжение 24,9 В и ток 99 мА. Стабилизация

ция должна быть по напряжению. Чтобы более плавно регулировать напряжение сетки, напряжение на Б5-49 можно уменьшать до 10 В. Величина напряжения на сетке регулируется на стенде ручкой «Регулировка напряжения сетки», а полярность – тумблером «Полярность сетки». При этом переключатель «Тип электрода» должен находиться в положении «Сетка», а переключатель «Ток – напряжение» – в положении $U_{\text{макс}} = 20,00$ В. Задают $U_c = 0$ В, устанавливают переключатель «Тип электрода» в положение «А» (анод), переключатель «Ток – напряжение» – в положение $U_{\text{макс}} = 200,0$ В. Далее ручкой «Напряжение анода» на источнике питания УИП-2 изменяют напряжение на аноде в интервале от 10 до 115 В, фиксируя ток анода. Для этого переключатель «Ток – напряжение» устанавливают в положение «Ток» при каждом значении анодного напряжения. Результаты измерений заносят в табл. 2.2.

Далее на управляющую сетку подают отрицательное относительно катода напряжение U_c в интервале от -1 до -4 В. Для этого переключатель «Тип электрода» переводят в положение «Сетка»; «Полярность сетки» – на « \leftarrow », «Ток – напряжение» – в положение $U_{\text{макс}} = 20,00$ В и ручкой «Регулировка напряжения сетки» задают значения напряжения на сетке, например, $U_c = -1$ В. Затем переключатель «Тип электрода» переводят в положение «А» (анод), переключатель «Ток – напряжение» – в положение $U_{\text{макс}} = 200,0$ В. Изменяя анодное напряжение от нуля через интервалы в 10 – 20 В до максимального значения, фиксируют анодный ток, переводя переключатель «Ток – напряжение» в положение «Ток» и учитывая пределы измерения тока.

Аналогичные измерения производят для 3 – 4 значений отрицательного потенциала на сетке. Затем изменяют полярность напряжения на сетке на « \rightarrow », устанавливают $U_c = 1$ В. Изменяя напряжение на аноде в интервале от 10 до 70 В, фиксируют ток анода. При $U_c > 0$ ток анода резко возрастает. При

изменении U_a напряжение на сетке необходимо проверять и поддерживать постоянным. При положительной полярности напряжения на сетке $U_c > 1$ В не задавать!

Таблица 2.2

Результаты измерения статических анодных
и анодно-сеточных характеристик

$$I_a = f(U_a) \text{ при } U_c = \text{const}, U_H = \text{const}$$

$$I_a = f(U_c) \text{ при } U_a = \text{const}, U_H = \text{const}$$

$U_c, \text{ В}$	$I_a, \text{ мА}$				
	$U_{a1}, \text{ В}$	$U_{a2}, \text{ В}$	$U_{a3}, \text{ В}$...	$U_{an}, \text{ В}$
$U_c = 0$					
$U_c = -1$					
$U_c = -2$					
$U_c = -3$					
$U_c = -4$					
$U_c = +1$					

3. Построение графиков анодно-сеточных и анодных статических характеристик, определение параметров триода. Графики анодно-сеточных и анодных статических характеристик строят на основании результатов, записанных в табл. 2.2. Определение параметров триода S , R_i и μ производят в семействе анодно-сеточных и анодных статических характеристик для некоторой произвольной точки, лежащей на прямолинейной части одной из этих характеристик, путем построения характеристических треугольников, формулы (2.2), (2.3), (2.5).

Содержание отчета

Отчет о проделанной работе должен содержать:

1. Точное наименование и цель работы.
2. Таблицу основных (паспортных) данных исследуемого триода и схему его цоколевки.
3. Схему для снятия характеристик триода с краткой характеристикой входящих в нее элементов.
4. Таблицу наблюдений.
5. Графики $I_a = f(U_c)$ при $U_a = \text{const}$, $U_n = \text{const}$.
6. Графики $I_a = f(U_a)$ при $U_c = \text{const}$, $U_n = \text{const}$.
7. Расчет параметров S , R_i , и μ .
8. Краткие выводы.

Контрольные вопросы

1. Какую электронную лампу называют триодом?
2. Поясните принцип действия триода.
3. Нарисуйте семейство анодно-сеточных характеристик триода.
4. Нарисуйте семейство анодных характеристик триода.
5. Какими электрическими параметрами характеризуется триод?
6. Напишите основное уравнение триода. Что это уравнение показывает?
7. Охарактеризуйте емкостные параметры триода.
8. Какие бывают типы триодов?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ОСНОВ РАБОТЫ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ПРИБОРОВ

Цель работы: ознакомление с физическими основами действия, конструкцией и параметрами тиратрона тлеющего разряда с токовым управлением.

Используемое оборудование и материалы: универсальный источник питания УИП–2, стенд для измерения характеристик электровакуумных приборов, источник питания постоянного тока Б5-49, тиратрон тлеющего разряда МТХ-90.

Теоретическая часть

Газоразрядными называют наполненные газом или паром электровакуумные приборы, в которых движение электронов происходит в условиях ионизации наполнителя.

Конструктивно газоразрядные приборы представляют систему из двух или более электродов, помещенных в герметизированном стеклянном баллоне. Баллон обычно заполняется инертным газом (гелий, неон, аргон, криптон), водородом или парами ртути. Носителями зарядов в газоразрядных приборах являются не только электроны, но и ионы.

Газоразрядные приборы делятся на неуправляемые и управляемые. К управляемым относятся двухэлектродные приборы (стабилитроны, газотроны), к управляемым – многоэлектродные (тиратроны). По типу используемого катода различают приборы с холодным (ненакаливаемым) катодом и с горячим (накаленным) катодом.

Газотрон – двухэлектродный неуправляемый газоразрядный прибор, наполняемый инертным газом, водородом или парами ртути, основанный на использовании тлеющего или несамостоятельного дугового разряда.

Газотроны тлеющего разряда представляют собой

приборы с холодным катодом и графитовым анодом, работающие в режиме нормального тлеющего разряда; наполняются инертным газом (обычно He) при давлении 13 – 25 кПа. Выпрямляющее действие прибора основано на особенности конструкции электродов: поверхность катода во много раз превышает поверхность анода. Для повышения эмиссионной способности катода используют активирующее покрытие (цезий Cs, барий Ba).

Газотроны тлеющего разряда находят применение в качестве вентилях в системах зажигания двигателей внутреннего сгорания, при этом обратное напряжение может достигать нескольких кВ, средний ток составляет 10 – 12 мА, а отношение максимального тока к среднему составляет 7 – 9.

Тиратроном называется газотрон, снабженный третьим управляющим электродом (сеткой), расположенной между катодом и анодом.

Тиратрон тлеющего разряда представляет собой управляемый газоразрядный прибор с холодным катодом, в котором возникновение разряда в промежутке анод – катод осуществляется при помощи управляющего электрода.

Катод тиратрона (например, тиратрона типа МТХ-90) выполнен в виде никелевого цилиндра, внутренняя поверхность которого активируется цезием. Управляющий электрод выполнен в виде диска с отверстием в центре, через которое проходит стержневой анод из молибдена. Все это помещается в стеклянный баллон, заполненный неонам (давление 250 Па).

Уровень напряжения между анодом и катодом в тиратроне подбирается таким, при котором без участия поля управляющего электрода разряд невозможен. При подаче на управляющий электрод положительного потенциала (например 70 – 80 В для тиратрона типа МТХ-90) между управляющим электродом и катодом возникает тихий самостоятельный разряд, создающий начальную ионизацию. Тихий разряд является подготовительным, облегчающий возникновение ос-

нового тлеющего разряда между анодом и катодом. При этом потенциал зажигания тиратрона снижается и тиратрон открывается. Анодный ток, получаемый при открытии тиратрона, значительно больше тока в цепи его управляющего электрода, что характеризует усилительные свойства тиратрона.

При подаче напряжения между катодом и управляющим электродом (сеткой) в приборе возникает разряд между катодом – сеткой. Образовавшиеся в разряде заряженные частицы облегчают «пробой» основного газоразрядного промежутка: катод – анод. Изменением тока I_c во вспомогательном промежутке (катод – сетка) регулируют напряжение возникновения разряда U_3 в основном промежутке. Пусковая характеристика тиратрона $U_3 = f(I_c)$ приведена на рис. 3.1.

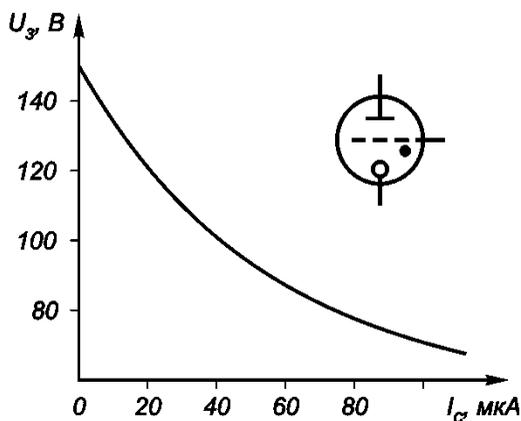


Рис. 3.1. Пусковая характеристика тиратрона тлеющего разряда

С момента зажигания тиратрона ток в анодной цепи его остается неизменным. После зажигания тиратрона изменением потенциала на сетке погасить его нельзя. Это объясняется тем, что поле управляющей сетки нейтрализуется положительными ионами. Тиратрон закрывается лишь после снятия

или снижения анодного напряжения до значения меньшего, чем напряжения горения U_{Γ} .

На рис. 3.2 показаны схемы включения тиратронов. Анодная цепь питается от источника E_a , напряжение которого меньше напряжения зажигания при нулевом напряжении сетки. При подаче на сетку положительного напряжения порядка десятков вольт между сеткой и катодом возникает вспомогательный тихий разряд. В следствие этого уменьшается напряжение зажигания тлеющего разряда между анодом и катодом $U_{аз}$. В тот момент, когда величина $U_{аз}$ становится равной напряжению на аноде включенного тиратрона E_a , зажигается тлеющий разряд, т.е. тиратрон включается, и анодная цепь замыкается.

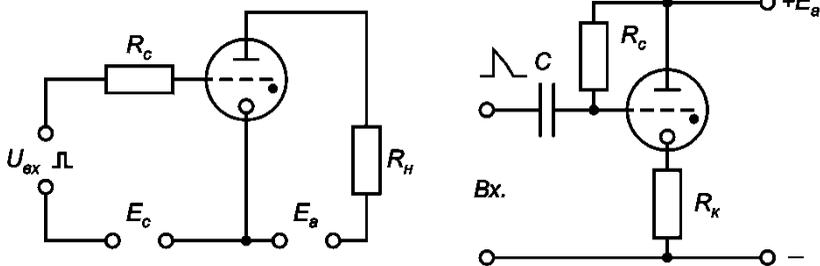


Рис. 3.2. Схемы включения тиратронов тлеющего разряда

Тиратроны работают при малых токах (до 50 мА) и средних анодных напряжениях (150 – 300 В).

Анодные характеристики тиратронов $U_a = f(I_a)$ представляют собой обычную характеристику нормального тлеющего разряда, рис. 3.3.

При увеличении напряжения между электродами в момент когда оно становится равным U_3 в приборе возникает тлеющий разряд и при дальнейшем увеличении напряжения источника питания увеличивается ток через прибор, а падение напряжения между его электродами остается почти постоян-

ным, равным $U_{кн}$ (катодному падению потенциала). Область I соответствует нормальному тлеющему разряду, область II – аномальному.

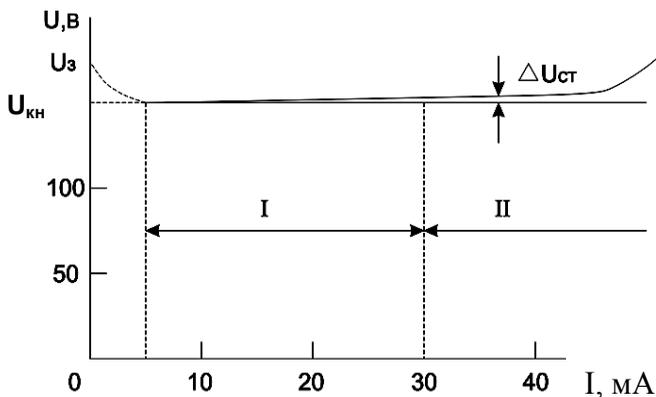


Рис. 3.3. Вольт-амперная характеристика тлеющего разряда

Основными параметрами тиратронов тлеющего разряда являются: падение напряжения между катодом – анодом, катодом – сеткой при прохождении тока через тиратрон, максимальное значение анодного тока, время восстановления электрической прочности, контрольные точки пусковых характеристик и долговечность. Различные типы этих тиратронов применяются главным образом в низкочастотных устройствах вычислительной техники и автоматики, например, в качестве электронных реле, позволяющих при малых токах в управляющей цепи коммутировать силовоточные схемы.

Схема исследований, необходимые приборы

Схема исследования тиратрона изображена на рис. 3.4. В качестве источников питания для схемы желательно использовать выпрямители со стабилизацией напряжения, например, УИП-2 и Б5-49.

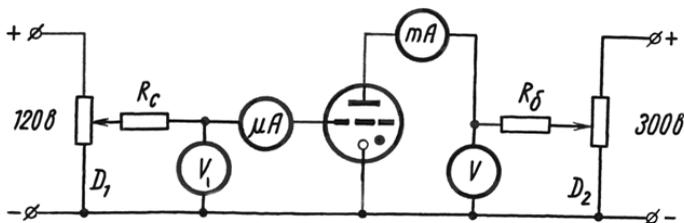


Рис. 3.4. Схема исследования тиратрона тлеющего разряда с токовым управлением

В качестве примера на рис. 3.5 приведена цоколевка тиратрона типа МТХ-90.

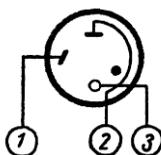


Рис. 3.5. Цоколевка тиратрона типа МТХ-90:
1 – сетка, 2 – анод, 3 – катод

Основные параметры некоторых тиратронов с холодным катодом приведены в таблице.

Порядок выполнения работы

1. Записать паспортные данные и зарисовать цоколевку исследуемого тиратрона.

2. Снять вольт-амперную характеристику $U_c = f(I_c)$ участка сетка – катод. Измерение вольт-амперной характеристики участка сетка – катод производят следующим образом. На стенде устанавливают переключатель «Тип лампы» в положение «Тир» (тиратрон). Напряжение на анод не подается. Переключатель «Тип электрода» находится в положении

Основные параметры тиратронов с холодным катодом

Основные параметры	Тип тиратрона		
	МТХ-90	ТХ-3Б	ТХ-4Б
Напряжение анода, В	160	< 190	< 225
Падение напряжения между анодом и катодом, В	50	100 – 115	110 – 120
Средний ток в цепи анода, мА	10	2,5	3,5
Амплитуда импульса анодного тока, мА	20	5	7
Падение напряжения между сеткой и катодом, В	40 – 55	85 – 87	89 – 95
Ток в цепи пускового электрода (ток зажигания), мкА	> 5	> 5	> 10
Габариты, мм			
высота	30	40	40
диаметр	12	10,2	10,2

«Сетка», «Полярность сетки» – в положении «+», переключатель «Ток – напряжение» – в положении «Ток». Напряжение на сетку подается от источника питания Б5-49, на котором необходимо задать следующий режим: напряжение 99,9 В; ток 89 мА. Ручкой «Регулировка напряжения сетки» на стенде задают ток на сетке тиратрона в интервале 1 – 25 мкА (0,001 – 0,025 мА, вся шкала прибора при этом измерении – 2 мА) и фиксируют соответствующее заданному току напряжение на сетке, изменяя положение переключателя «Ток – напряжение» на $U_{\text{макс}} = 200,0$ В. Строят зависимость $U_c = f(I_c)$. На этом графике наблюдается максимум, который соответствует напря-

жению и току, при которых возникает разряд в промежутке катод – сетка, т.е. это – ток и напряжение подготовительного разряда.

3. Снять вольт-амперную характеристику $U_a = f(I_a)$ участка анод – катод. Измерение вольт-амперной характеристики участка анод – катод производят следующим образом. На сетку подают напряжение, соответствующее максимуму зависимости $U_c = f(I_c)$ ($\sim 80 - 85$ В). Увеличивают напряжение на аноде до зажигания тиратрона, для этого переключатель «Тип электрода» переводят в положение «А» (анод) и рукояткой «Напряжение анода» на УИП-2 осуществляют подачу напряжения (переключатель «Ток – напряжение» – в положении $U_{\text{макс}} = 200,0$ В). Продолжают увеличивать напряжение на аноде до тех пор, пока ток на аноде не увеличится до 18 мА (переключатель «Ток – напряжение» переводят в положение «Ток»). После этого медленно уменьшают напряжение на аноде, фиксируя напряжение и ток на аноде, пока тиратрон не погаснет.

4. Снять пусковую характеристику $U_{a3} = f(I_c)$ тиратрона. Пусковая характеристика тиратрона с токовым управлением измеряется следующим образом: при потенциале анода, равном нулю, устанавливается значение тока подготовительного разряда $I_c \approx 8 - 9$ мкА, которое отмечается по микроамперметру (переключатель «Тип электрода» – в положении «Сетка», переключатель «Ток – напряжение» – в положении «Ток», величина тока устанавливается вращением ручки «Регулировка напряжения сетки»). Затем увеличивается потенциал анода тиратрона до возникновения в нем разряда (переключатель «Тип электрода» – в положении «А» (анод), переключатель «Ток – напряжение» – в положении $U_{\text{макс}} = 200,0$ В, увеличение напряжения осуществляют ручкой «Напряжение анода» на УИП-2). Показания вольтметра в момент возникновения тока в основном промежутке тиратрона соответствует потенциалу зажигания. Для получения следующей точки характе-

ристики необходимо погасить тиратрон, установив $U_a < U_{аз}$, затем установить следующее значение I_c . Плавно увеличивая U_a , снова зажечь тиратрон. Аналогично снимают остальные точки пусковой характеристики. Рекомендуется выбирать $I_c = 8 - 40$ мкА.

5. По пусковой характеристике $U_{аз} = f(I_c)$ определить чувствительность тиратрона $h = dU_{аз}/dI_c$ на крутом и пологом участках характеристики.

Содержание отчета

Отчет о проделанной работе должен содержать:

1. Точное наименование и цель работы.
2. Таблицу основных (паспортных) данных исследуемого тиратрона и схему его цоколевки.
3. Схему для снятия характеристик тиратрона с краткой характеристикой входящих в нее элементов.
4. Таблицы наблюдений.
5. Графики $U_a = f(I_a)$, $U_c = f(I_c)$ и $U_{аз} = f(I_c)$.
6. Краткие выводы.

Контрольные вопросы

1. Что называется ионизацией газа? Как происходит свечение в ионных приборах?
2. Нарисуйте вольт-амперную характеристику двухэлектродного газонаполненного прибора.
3. Расскажите о несамостоятельном и самостоятельном разряде в газе.
4. Расскажите о нормальном и аномальном тлеющем разряде.
5. Расскажите о самостоятельном дуговом разряде.
6. Расскажите о принципе работы газотронов.
7. Расскажите о принципе работы тиратрона тлеющего разряда.
8. Нарисуйте пусковую характеристику тиратрона тлеющего разряда.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Булычев А.Л. Электронные приборы [Текст] / А.Л. Булычев, В.А. Прохоренко. Минск: Вышэйш. шк., 1987. 316 с.
2. Дулин В.Н. Электронные приборы [Текст] / В.Н. Дулин. М.: Энергия, 1977. 424 с.
3. Морозова И.Г. Физика электронных приборов / И.Г. Морозова. М.: Атомиздат, 1980. 392 с.
4. Свистова Т.В. Вакуумная и плазменная электроника [Текст]: учеб. пособие: в 2-х ч. / Т.В. Свистова. Воронеж, 2005.
5. Соболев В.Д. Физические основы электронной техники [Текст] / В.Д. Соболев. М.: Высш. шк., 1979. 448 с.
6. Сушков А.Д. Вакуумная электроника: Физико-технические основы [Текст]: учеб. пособие / А.Д. Сушков. СПб: Лань, 2004. 464 с.
7. Фридрихов С.А. Физические основы электронной техники [Текст] / С.А.Фридрихов, С.М.Мовнин. М.: Высш. шк., 1982. 608 с.
8. Щука А.А. Электроника [Текст]: учеб. пособие / А.А. Щука; под ред. А.С. Ситова. СПб: БХВ-Петербург, 2005. 800 с.
9. Электронные приборы [Текст] / В.Н. Дулин, Н.А. Аваев, В.П. Демин и др.; под ред. Г.Г. Шишкина. М.: Энергоатомиздат, 1989. 496 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	1
Организация и проведение лабораторных работ	3
Лабораторная работа № 1	6
Лабораторная работа № 2	15
Лабораторная работа № 3	27
Библиографический список	36

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине
«Физические основы электроники»
для студентов направления подготовки бакалавров
11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», профиля
«Микроэлектроника и твердотельная электроника»
очной формы обучения
Часть 1

Составитель
Свистова Тамара Витальевна

В авторской редакции

Подписано к изданию 17.05.2016
Уч.-изд. л. 2,2

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14