

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет “ЛЭТИ”

Б. В. ИВАНОВ А. Д. ТУПИЦЫН А. К. ШАНУРЕНКО

**ПРИМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИОГРАФА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ВАКУУМНЫХ И ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ**

Учебное пособие

Санкт-Петербург
Издательство СПбГЭТУ “ЛЭТИ”
2012

УДК 621.372, 621.382
ББК 3 852я7 + 3 851.1я7
И20

Иванов, Б. В., Тушицын, А. Д., Шануренко, А. К.

И20 Применение харктериографа для исследования вакуумных и твердотельных приборов: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2012. 100 с.

ISBN 978-5-7629-1153-5

Содержит основные сведения об устройстве, принципах действия вакуумных и полупроводниковых приборов и сущности харктериографических исследований этих приборов. Приведены описания лабораторных работ по исследованию характеристик основных типов вакуумных и полупроводниковых приборов с использованием харктериографа.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 550700 “Электроника и микроэлектроника”, 210100 “Электроника и наноэлектроника”.

УДК 621.372, 621.382
ББК 3 852я7 + 3 851.1я7

Рецензенты: кафедра физической электроники радиофизического факультета СПб ГПУ; зам. директора по научной работе Р. Г. Шифман (ЗАО «Светлана-Электронприбор»).

Утверждено
редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

ISBN 978-5-7629-1153-5

© СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2012

1. ХАРАКТЕРИОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

1.1. Принципы харктериографических исследований

При исследовании различных типов электронных приборов, как вакуумных, так и полупроводниковых, значительное время занимает процесс построения статических характеристик и определения по ним параметров приборов. Этот процесс достаточно трудоёмкий и может сопровождаться большими ошибками за счёт методической и инструментальной погрешности приборов.

Более прогрессивным является исследование статических характеристик с помощью харктериографов. Сущность харктериографических исследований заключается в приложении к объекту исследования изменяющегося напряжения, вызывающего ток, протекающий через объект, с последующим отображением зависимости этого тока от напряжения в прямоугольной системе координат.

В качестве примера рассмотрим схему, представленную на рис. 1.1.

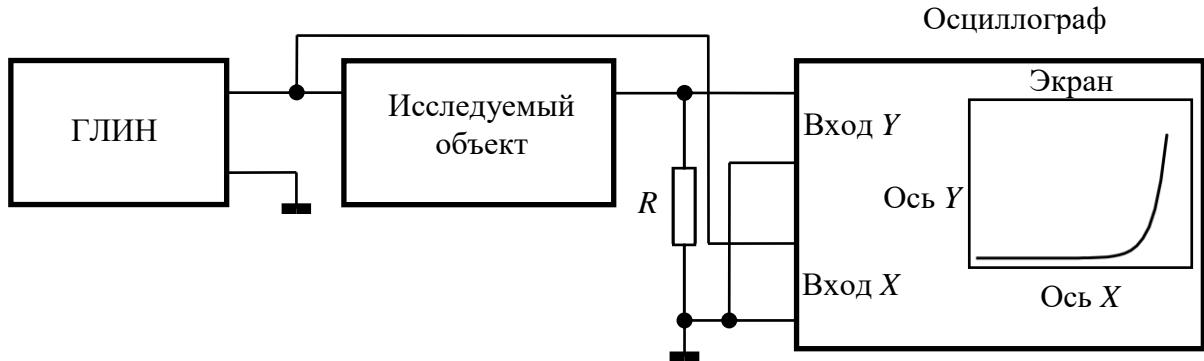


Рис. 1.1

Здесь исследуемый объект подключён к генератору линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН). Ток объекта исследования протекает через последовательно включённое измерительное сопротивление R , создавая на нём пропорциональное току напряжение. Если подать линейно изменяющееся напряжение, например, на входы горизонтального отклонения луча электронно-лучевой трубки осциллографа X , а напряжение с измерительного сопротивления – на входы вертикального отклонения луча осциллографа Y , то траектория электронного луча на экране будет представлять собой зависимость тока объекта (напряжения на резисторе R , пропорционального току объекта)

от приложенного к нему напряжения, т. е. его вольт-амперную характеристику (ВАХ). На рис. 1.1 это ВАХ полупроводникового диода.

Рис. 1.1 иллюстрирует работу аналогового харктериографа. При необходимости входы X и Y осциллографа могут быть заменены аналого-цифровыми преобразователями для представления и обработки результатов измерения в цифровой форме.

В данном примере напряжение, приложенное к объекту, изменяется по линейному закону. Следует отметить, что закон изменения напряжения может быть иным, например синусоидальным, что часто применяется в аналоговых харктериографах. Это удобно благодаря возможности использования регулируемого напряжения питающей сети.

В промышленно выпускаемых харктериографах устройства индикации объединены в один блок с другими устройствами, входящими в состав харктериографа. Исследуемый объект подключается между выводными терминалами харктериографа и общей точкой схемы – «землёй» (рис. 1.2).

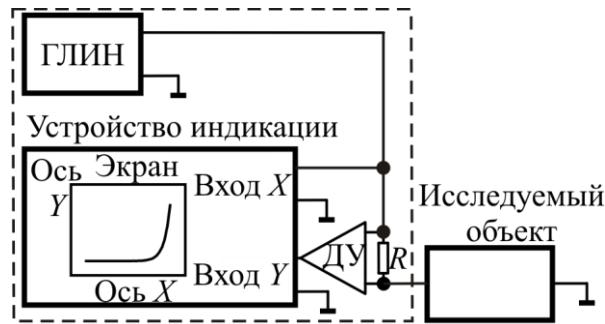


Рис. 1.2

Здесь падение напряжения на измерительном сопротивлении R поступает на вход Y устройства индикации через дифференциальный усилитель DU , выходное напряжение которого пропорционально разности потенциалов между его входами, т. е. падению напряжения на измерительном сопротивлении R в данном случае. DU необходимо потому, что сопротивление R не соединено с общей точкой схемы, как на рис. 1.1.

Приведённые ранее схемы применимы для исследования двухвыводных приборов. В случае необходимости исследования приборов с большим числом выводов в состав харктериографа вводятся дополнительные источники напряжения или тока специальной формы, чаще всего – ступенчатого. Они позволяют наблюдать на экране одновременно семейство характеристик, каждая из которых соответствует своему значению напряжения (тока) ступени, так как каждому проходу луча по экрану индикаторного устройства соответствует своё фиксированное значение напряжения (тока) ступени, подаваемого, например на управляющий вывод прибора.

Пример такого измерения представлен на рис. 1.3. Здесь исследуемый объект (биполярный $n-p-n$ -транзистор) подключён через измерительное со-

противление к выходу ГЛИН выводом коллектора К. База Б подключена к выходу генератора ступенчатого тока ГСТ. Эмиттер транзистора Э заземлён. Работа генераторов синхронизирована.

Данная схема позволяет наблюдать семейство выходных характеристик биполярного транзистора, каждой из которых соответствует свой ток базы. Временные диаграммы напряжений при таком измерении представлены на рис. 1.4.

Здесь показан промежуток времени, равный трём периодам линейно изменяющегося напряжения $U_{ГЛИН}$. Каждому из периодов соответствует свой ток базы Б транзистора (ток ГСТ), временная зависимость которого изображена на графике $I_{ГСТ}$. Так как ток коллектора К транзистора зависит от тока базы, траектории электронного луча Y на экране устройства индикации будут отличаться друг от друга. В течение каждого периода

$U_{ГЛИН}$ на экране будет отображаться лишь одна из трёх зависимостей Y , но в силу инерционности зрительного восприятия изображение на экране устройства индикации будет выглядеть так, как это показано на рис. 1.3. Следует отметить, что зависимости Y представлены на рис. 1.4 упрощённо. При наличии достаточного количества генераторов можно исследовать приборы с количеством выводов, превышающим 3. Для этого также можно использовать внешние источники напряжения или тока.

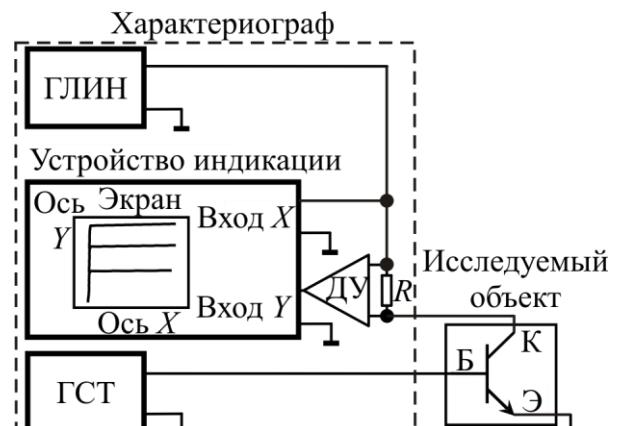


Рис. 1.3

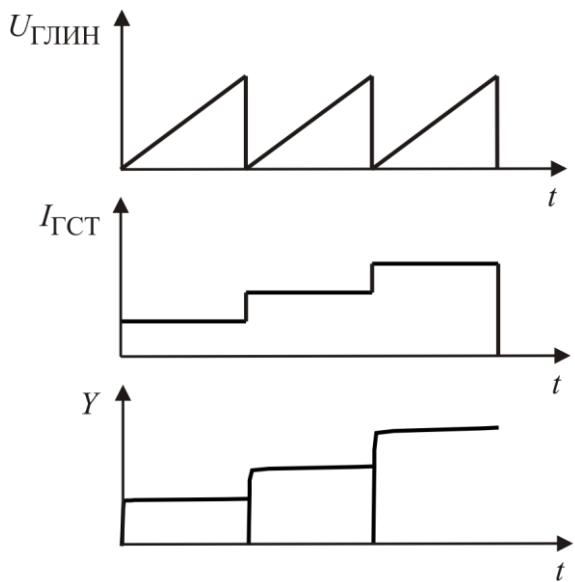
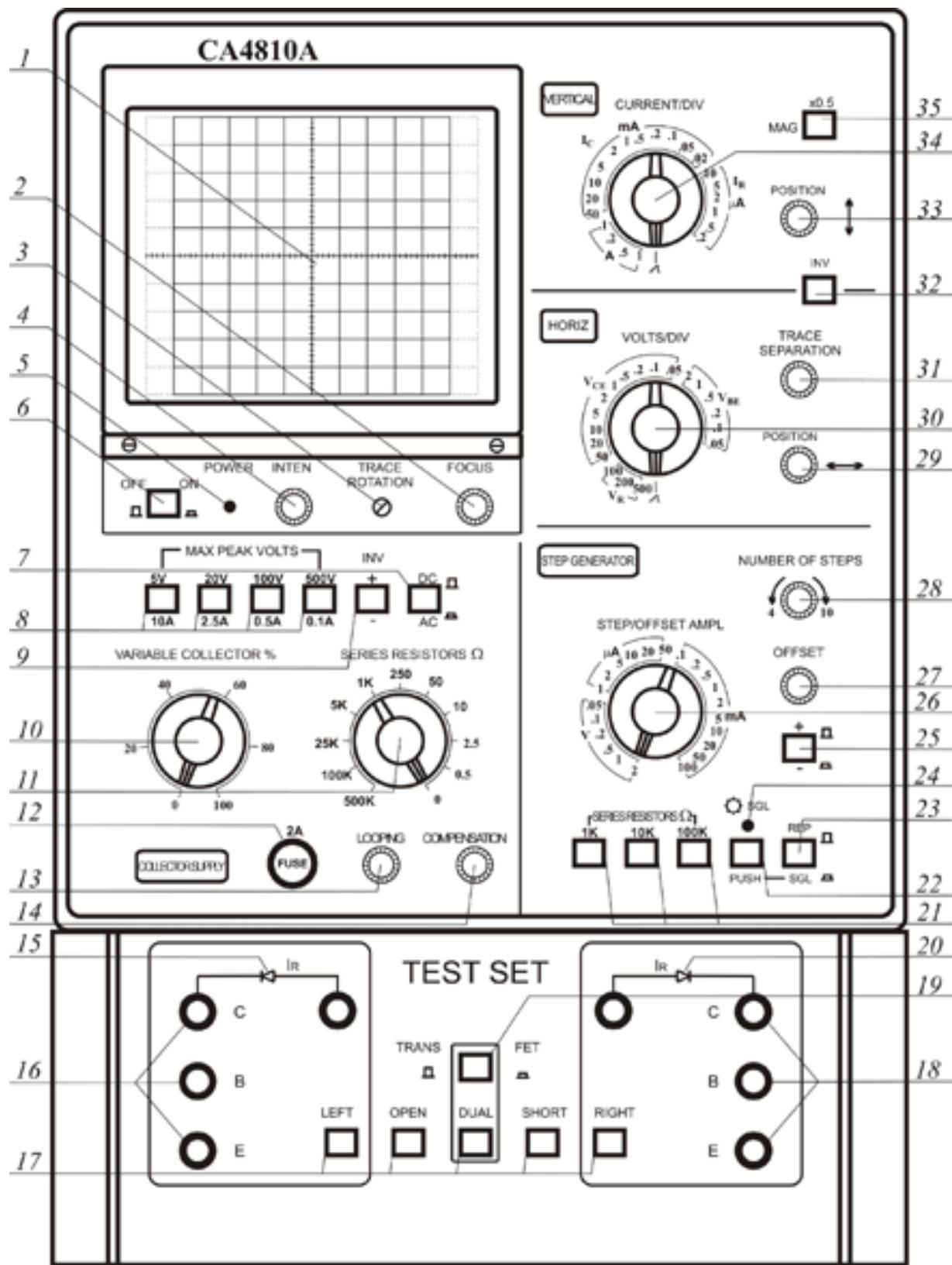


Рис. 1.4

1.2. Внешний вид и органы управления характеристиографа

Внешний вид характеристиографа СА4810А (Madell Technology Corporation) представлен на рис. 1.5. Он состоит из двух основных частей –



Puc. 1.5

лицевой и коммутационной (TEST SET) панелей.

Лицевая панель разбита на пять полей – экранное (элементы 1 – 6), COLLECTOR SUPPLY (элементы управления питанием цепи коллектора 7 –

14), VERTICAL (элементы управления и калибровки вертикального отклонения луча на эране 32 – 35), HORIZ[ONTAL] (элементы управления и калибровки горизонтального отклонения луча на эране 29 – 32) и STEP GENERATOR (органы управления генератором ступенчатых сигналов 21 – 28). К коммутационной панели относятся элементы, обозначенные позициями с 15 по 20.

Экранное поле состоит из экрана электронно-лучевой трубы 1 – индикатора, регуляторов фокусировки луча (FOCUS) 2, горизонтального выравнивания развёртки луча (TRACE ROTATION) 3 и яркости (INTEN) 4. На экране имеется координатная сетка для отсчёта значений токов и напряжений размером 10 x 10 делений, каждое из которых разбито на 5 малых делений – по 0,2 большого деления каждое. На этом поле также располагаются индикатор питания харкетиографа (POWER) 5 и кнопка включения питания 6. Здесь символ  (OFF) означает выключенное состояние прибора,  (ON) – включённое.

Название поля COLLECTOR SUPPLY (элементы управления питанием цепи коллектора) достаточно условно, так как выходное напряжение, которое регулируют органы управления, находящиеся на этом поле, может быть приложено не только к коллекторному выводу биполярного транзистора, но и к другим выводам самых разных приборов – диодов, тиристоров, полевых транзисторов и т. д., включая вакуумные приборы. Выходное напряжение источника, регулируемого данными органами управления, может быть как знакоизменным (синусоидальным) – положение  (AC – переменный ток) переключателя 7, так и однополярным – положение  (DC – постоянный ток; в данном приборе – однополярные синусоидальные импульсы) переключателя 7. Переключатель 9 (INV – инверсия) позволяет изменять полярность выходного напряжения – положительная в отжатом положении (+), отрицательная в нажатом положении (-). При этом изменяется полярность синусоидальных импульсов, а переменное напряжение меняет фазу на 180°.

Четыре кнопки 8 (MAX PEAK VOLTS – максимальное напряжение) определяют пределы регулировки пикового (амплитудного) значения выходного переменного (импульсного) напряжения. Им соответствуют пределы 5 В (максимально допустимый выходной ток – 10 А), 20 В (2,5 А), 100 В (0,5 А) и 500 В (0,1 А).

С помощью регулятора 10 (VARIABLE COLLECTOR – плавная регулировка коллекторного напряжения) устанавливается конкретное значение вы-

ходного напряжения, прикладываемого к объекту исследования. Регулятор отградуирован в процентах от максимального выходного напряжения. То есть, если выбран предел выходного напряжения 20 В (кнопки 8), а регулятор 10 установлен в положение 80, то амплитудное значение выходного напряжения составляет 16 В.

Переключатель 11 (SERIES RESISTORS – последовательные сопротивления) позволяет изменять величину резистора, включённого последовательно с объектом исследования на выходе характеристографа с целью ограничения максимального выходного тока. Чем больше данное сопротивление, тем меньший ток будет протекать во внешней цепи, например в случае короткого замыкания в ней. Следует учитывать тот факт, что чем меньше ограничительное сопротивление отличается от внутреннего сопротивления объекта исследования, тем большие искажения вносятся в исследуемые характеристики объекта, так как в этом случае выходной ток характеристографа определяется не только свойствами объекта, но и ограничительным резистором.

На поле COLLECTOR SUPPLY также находятся колодка предохранителя (FUSE) 12 и регуляторы LOOPING 13 и COMPENSATION 14, использующиеся для компенсации ёмкостных токов, порождаемых ёмкостями измерительной цепи и объекта исследования. Эти токи являются источником погрешности при измерении ВАХ, которые определяются только токами проводимости. При измерениях на малых токах (при больших сопротивлениях объекта исследования) эта погрешность может стать существенной.

Отрегулированное органами управления на поле COLLECTOR SUPPLY напряжение подаётся на соответствующий вывод объекта исследования через гнездо С на коммутационной панели TEST SET. Она позволяет подключать к характеристографу одновременно два однотипных объекта, например, для сравнения их характеристик. Поэтому на ней находятся два одинаковых набора присоединительных гнёзд. Элементы 15 и 20 это две пары гнёзд, которые используются при измерении обратных ветвей ВАХ $p-n$ -переходов (I_{R}). Два одинаковых набора гнёзд 16 и 18 – основные присоединительные гнёзда. Они обозначены как С – гнёзда для присоединения коллекторных выводов транзисторов, В – для присоединения выводов базы, Е – для подключения эмиттерных выводов. Как уже отмечалось, они могут использоваться и для подключения различных выводов других приборов.

Два набора присоединительных гнёзд равнозначны и могут использоваться как одновременно, так и независимо друг от друга. Режимы их ис-

пользования определяются переключателями на коммутационной панели. Группа переключателей 17 позволяет выбрать для измерений левый (LEFT) набор присоединительных гнёзд, правый (RIGHT) или оба (DUAL) для сравнительных измерений. При нажатой кнопке OPEN реализуется разрыв цепи гнезда В, что позволяет измерять обратный ток коллектора биполярного транзистора (ток базы, подключённой к гнезду В, равен нулю). При нажатой кнопке SHORT (короткое замыкание) гнездо В соединяется с общей точкой схемы – «землёй». Данный режим предназначен для измерения начального тока стока полевого транзистора (потенциал затвора полевого транзистора, подключённого к гнезду В, равен нулю). Переключатель 18 предназначен для выбора режимов измерения биполярный транзистор (TRANS) – полевой транзистор (FET).

Поле STEP GENERATOR на лицевой панели харктерографа предназначено для управления выходным сигналом генератора ступенчатого напряжения или тока. Количество ступеней (см. рис. 1.4, зависимость $I_{ГСТ}$) определяет число кривых в семействе характеристик и изменяется с помощью регулятора 28 NUMBER OF STEPS от 4 до 10.

Переключатели SERIES RESISTORS (последовательные сопротивления) 21 изменяют значение сопротивления, включённого последовательно с гнездом В на коммутационной панели для ограничения выходного тока генератора ступенчатого сигнала. Значения сопротивлений составляют 1, 10 и 100 кОм.

Кнопки 22 и 23 позволяют реализовать однократный и повторяющийся режимы измерений характеристик. Кнопка 23 REP[EAT] (повтор) – SGL (SINGLE – однократное измерение) в отжатом положении □ обеспечивает режим повторяющихся измерений, при котором характеристики объекта исследования постоянно отображаются на экране. В нажатом положении □ прибор переходит в режим однократного измерения, запускаемый нажатием кнопки PUSH 22, над которой располагается светодиодный индикатор однократного режима измерения 24 (⌚ SGL). При этом изображение кратковременно появляется на экране. Такой режим – режим однократной кратковременной подачи напряжений (токов) на объект исследования – может быть полезен для исследования мощных приборов, которые при измерениях в непрерывном режиме рассеивают значительную мощность и, нагреваясь, могут выйти из строя. Переключатель полярности выходных импульсов генератора 25 в положении □ обеспечивает положительную полярность выходного

напряжения (тока) генератора ступенчатого сигнала. В положении **■** полярность меняется на отрицательную.

Многопредельный переключатель 26 STEP/OFFSET AMPL определяет амплитуды ступеней выходного напряжения (тока), а также тип выхода генератора. Когда выбран один из пределов сектора V, генератор ступенчатого сигнала является генератором напряжения с возможными значениями амплитуд каждой из ступеней 0,05...2 В. Для секторов μ А или мА выход генератора ступенчатого сигнала превращается в генератор тока с фиксированными токами ступеней. Эти токи лежат в диапазоне от 1 м μ А до 100 мА.

Регулятор 27 OFFSET (смещение) позволяет сдвигать одновременно все ступени ступенчатого сигнала в случае, когда напряжение (ток) ни одной из ступеней не принимает требуемого значения из-за дискретности установки с помощью переключателя 26.

На поле HORIZ[ONTAL] лицевой панели располагаются элементы управления и калибровки горизонтального отклонения луча на экране. К ним относятся регулятор POSITION (положение луча) 29 для горизонтального перемещения луча по экрану и регулятор 31 TRACE SEPARATION (разделение кривых), использующийся при одновременном наблюдении на экране ВАХ двух однотипных объектов исследования в режиме сравнения.

Многопозиционный переключатель VOLTS/DIV (вольт на деление) 30 определяет масштаб изображения по горизонтальной оси – цену больших делений координатной сетки на экране. Она может лежать в диапазоне 0,05...500 В на деление. Цены деления, находящиеся в секторе VR, относятся к режиму измерения обратных ветвей ВАХ диодов с большими допустимыми обратными напряжениями. Для них используется дополнительная высоковольтная (до 5 кВ) сменная коммутационная панель. В рамках данного лабораторного практикума эти пределы переключателя не используются.

Значения цен делений, относящиеся к сектору VCE, используются для определения напряжения, приложенного к выходному (например – к коллекторному для биполярного транзистора) выводу объекта исследования, ВАХ которого отображается на экране. При установке переключателя на один из пределов из сектора VBE по горизонтальной оси отображается напряжение, поданное на вывод, подключённый к гнезду B (на базу биполярного транзистора). То есть в первом случае на экране наблюдаются зависимости выходного тока от выходного напряжения (потенциала гнезда C), во втором – зависимости выходного тока от входного напряжения (тока) – передаточные ха-

рактеристики (характеристики управления). Следует отметить, что зависимостями выходного тока от входного напряжения характеризуются полевые транзисторы или электронные лампы (приборы с потенциальным управлением). Зависимостями выходного тока от входного тока могут характеризоваться усиительные свойства (коэффициент передачи по току) биполярного транзистора. Для получения передаточных характеристик полевых транзисторов необходимо установить переключатель 30 на один из пределов, относящихся к сектору VBE, а переключатель 26 – на один из пределов сектора V. Для получения зависимостей выходного тока от входного следует установить переключатель 30 на один из пределов, относящихся к сектору VBE, а переключатель 26 – на один из пределов секторов μ A или mA.

На поле VERTICAL лицевой панели располагаются элементы управления и калибровки вертикального отклонения луча на экране. К ним относятся регулятор POSITION (положение луча) 33 для вертикального перемещения луча по экрану и переключатель MAG[NIFY] (увеличить) 35, позволяющий уменьшить цену вертикального деления в два раза, растянув кривые на экране по вертикали для лучшей детализации.

Многопозиционный переключатель CURRENT/DIV (ток на деление) 34 определяет масштаб изображения по вертикальной оси – цену больших делений координатной сетки на экране. Она может лежать в диапазоне от 0,02 μ A до 1 A на деление. Цены деления, находящиеся в секторе I_r , относятся только к режиму измерения обратных ветвей ВАХ диодов (гнёзда I_r коммутационного блока). Диапазон значений составляет 0,2...10 μ A. Сектора mA и A используются при измерении выходных токов объектов исследования, например – коллекторных токов биполярных транзисторов I_c .

1.3. Подключение объектов исследования к харктериографу

В рамках лабораторных практикумов по дисциплинам «Вакуумная и плазменная электроника» и «Твердотельная электроника» исследуются различные приборы, имеющие разные размеры, форму и количество выводов. Для их подключения к харктериографу используется внешний коммутационный блок, присоединительная панель которого изображена на рис. 1.6.

Подключение осуществляется с помощью проводников. При этом соединяются одноимённые гнёзда харктериографа и коммутационного блока: гнездо С харктериографа с гнездом С коммутационного блока, гнездо В

характериографа с гнездом В коммутационного блока, гнездо Е характериографа с гнездом Е коммутационного блока.

Внутри коммутационного блока осуществлены электрические соедине-

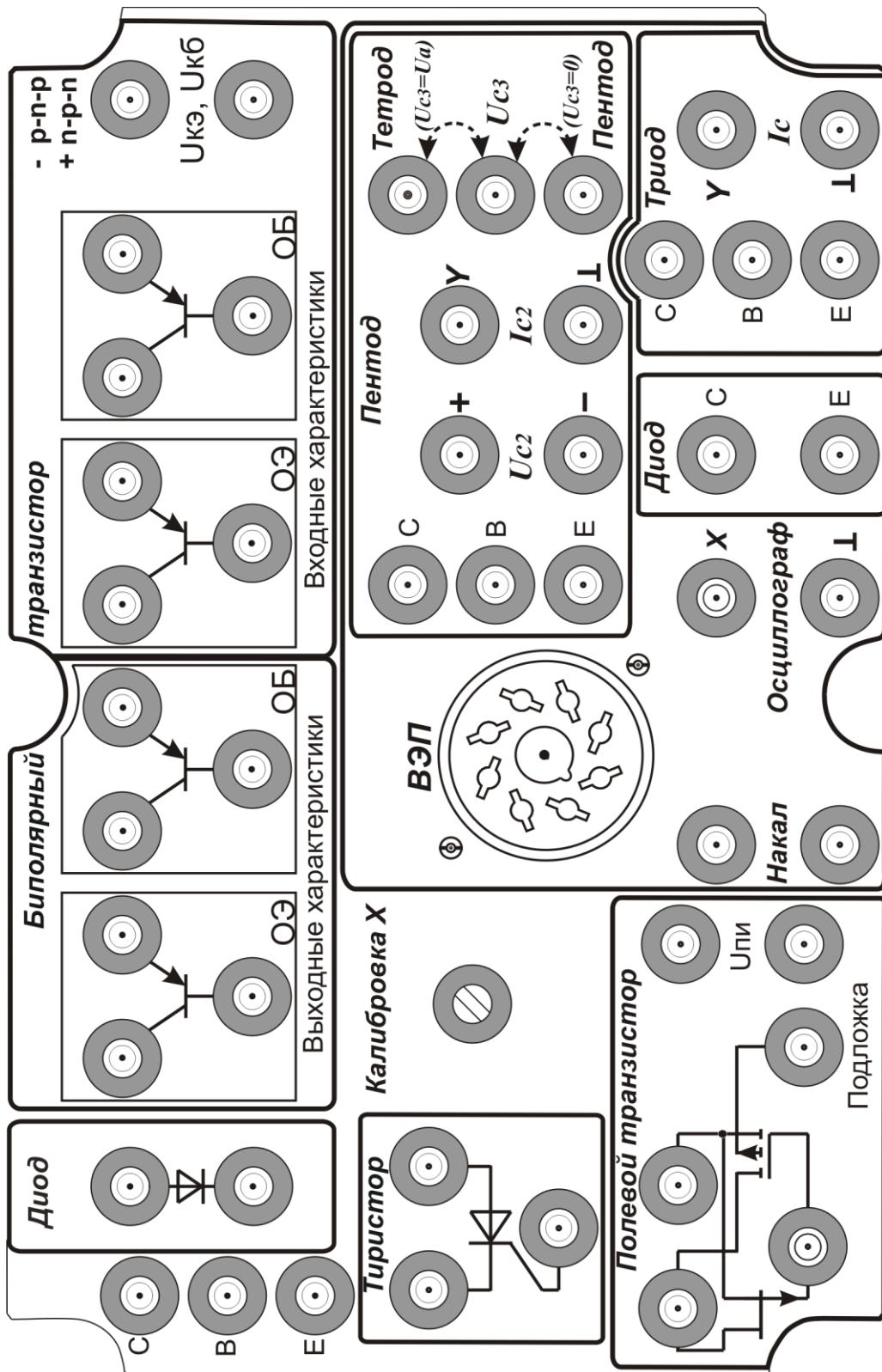


Рис. 1.6

ния, требуемые для проведения конкретных видов измерений. Поскольку при этих измерениях могут потребоваться различные виды подключения одного и того же прибора к харктериографу, на присоединительной панели коммутационного блока имеется несколько групп гнёзд для присоединения одного и того же объекта исследования.

Следует обратить внимание на то, что на присоединительной панели коммутационного блока имеется несколько групп гнёзд С-В-Е для соединения с харктериографом. В описаниях лабораторных работ будет указано, какие из них используются в данной работе.

Присоединительная панель коммутационного блока разбита на несколько полей. Поля Диод, Тиристор, Полевой транзистор и Биполярный транзистор используются при исследовании полупроводниковых приборов. На рис. 1.7 приведён внешний вид лабораторного макета для исследования двухвыводных приборов – выпрямительных, туннельных и обращённых диодов, стабилитронов. Макет, изображённый на рис. 1.8, применяется при работе с трёх- и четырёхвыводными приборами – тиристорами, биполярными и полевыми транзисторами. Макеты состоят из прозрачного диэлектрического кожуха, предотвращающего возможные прикосновения к объекту под напряжением, основания, в котором закреплены контактные выводы и электрически соединённые с ними объекты исследования.

При наличии у объекта четырёх выводов на одной из боковых стенок кожуха располагается дополнительное контактное гнездо для присоединения данного вывода к измерительной схеме с помощью проводника.

Поле Диод предназначено для исследования выпрямительных диодов, стабилитронов, туннельных и обращённых диодов. При работе с этим полем следует обращать внимание на присоединение объекта исследования – анод

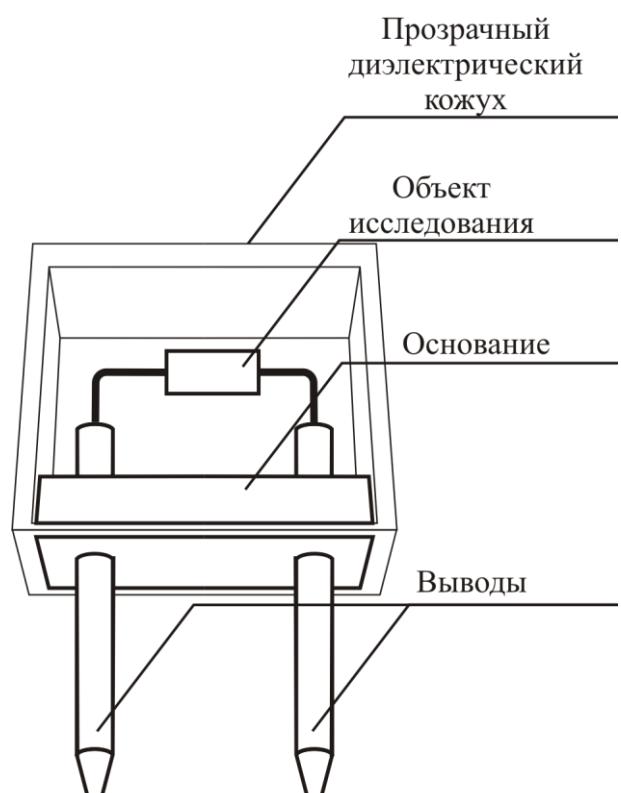


Рис. 1.7

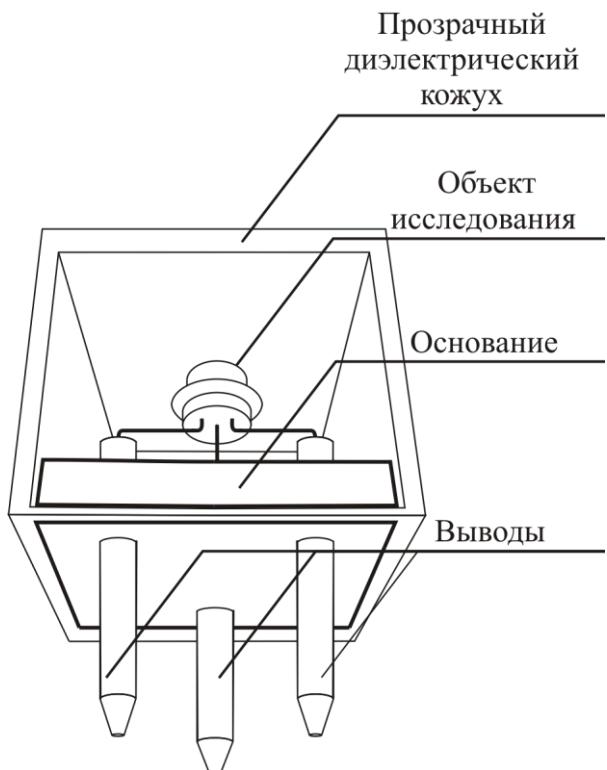


Рис. 1.8

диода должен соединяться с анодным гнездом в соответствии с обозначением, имеющимся на данном поле. При соединение других объектов исследования к коммутационному блоку с учётом асимметрии взаимного расположения их выводов однозначно и не требует особого контроля.

Следующее поле – Тиристор. Оно предназначено для подключения трёхвыводных приборов в отличие от поля Диод и содержит три присоединительных гнёзда.

Поле Полевой транзистор предназначено для исследования транзисторов как с управляемым

$p-n$ -переходом, так и с изолированным затвором. Поэтому в дополнение к трём основным присоединительным гнёздам здесь имеются гнёзда Подложка и $U_{\text{ПИ}}$. Они позволяют подавать на вывод подложки полевого транзистора напряжение, отличное от нуля, для наблюдения за его влиянием на характеристики транзистора. Для этого гнездо на диэлектрическом кожухе, в котором располагается исследуемый транзистор, соединяют проводником с гнездом Подложка, а к гнёздам $U_{\text{ПИ}}$ подсоединяется внешний источник напряжения подложки. При этом важно, чтобы на верхнее гнездо подавалось положительное по отношению к нижнему напряжение для транзистора с p -каналом и отрицательное – для n -канального транзистора.

Для исследования биполярных транзисторов предназначены два поля, каждое из которых содержит по два набора присоединительных гнёзд. Это объясняется тем, что как входные, так и выходные характеристики, исследуются для двух схем включения – с общим эмиттером (ОЭ) и с общей базой (ОБ). При этом для исследования входных характеристик необходима подача внешних напряжений «коллектор – эмиттер» $U_{\text{КЭ}}$ для схемы с общим эмиттером или «коллектор – база» $U_{\text{КБ}}$ для схемы с общей базой. Для работы с $p-n-p$ -транзисторами (показанными на присоединительной панели) на верхнее гнездо подается отрицательное относительно нижнего гнезда напряжение, для $n-p-n$ -транзисторов – положительное. Чтобы снять входную харак-

теристику для нулевого потенциала коллектора, необходимо закоротить гнёзда $U_{КЭ}$, $U_{КБ}$ внешним проводником.

При исследовании вакуумных электронных приборов используется поле ВЭП. Оно содержит три сегмента – Диод, Триод и Пентод для исследования одноимённых приборов. Кроме того, на поле ВЭП находятся общие для всех трёх сегментов ламповая присоединительная панель, гнёзда Накал для подачи напряжения накала и гнёзда Осциллограф, к которым подключается вход X горизонтального отклонения луча внешнего осциллографа при одновременном снятии анодных и сеточно-анодных характеристик триодов, тетродов и пентодов.

В связи с тем, что исследование процессов в ВЭП проводится с использованием различных приборов, имеющих отличающиеся габариты, количество выводов и присоединительные размеры, не удается обойтись использованием одной ламповой присоединительной панели. В частности, при исследовании таких вакуумных приборов, как диод, тетрод и пентод объекты устанавливаются непосредственно на ламповую панель. Это связано с тем, что они имеют октальный цоколь с восемью соединительными штырьками, соответствующий панели (рис. 1.9). Ключ, имеющийся на цоколе, предотвращает неправильную установку лампы.

В случае исследования ВЭП с девятью выводами, не имеющими цоколя, используется переходной соединитель, как это показано на рис. 1.10. В верхней части соединителя находится ламповая панель на девять штырьков, в нижней – октальный цоколь.

При исследовании каждого из вакуумных приборов для соединения с характеристиографом используются гнёзда на соответствующем сегменте поля ВЭП. Для диода – гнёзда С и Е сегмента Диод, для триодов и пентодов – гнёзда С, В и Е на соответствующем сегменте.

Сегмент Триод содержит также гнёзда I_C для подключения входа Y канала вертикального отклонения луча внешнего осциллографа, используемые при одновременном снятии анодных и сеточно-анодных характеристик триодов.

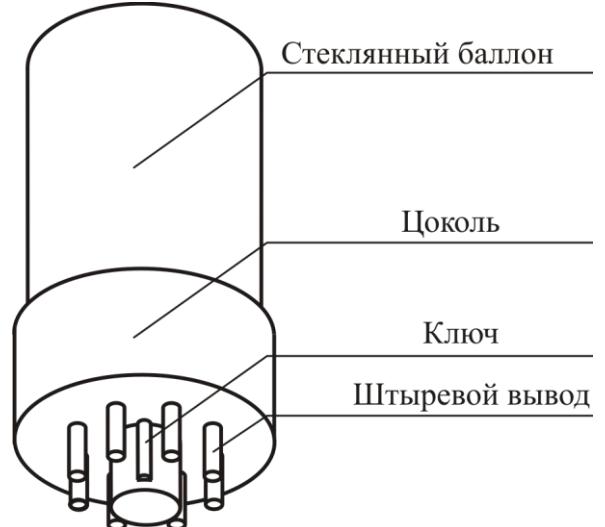


Рис. 1.9

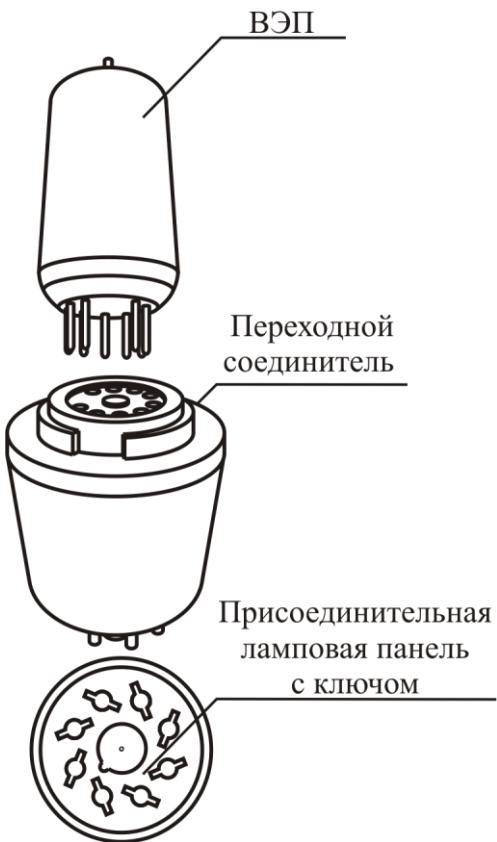


Рис. 1.10

дов. Аналогичные по назначению гнезда I_{C2} используются при снятии сеточно-анодных характеристик тетродов и пентодов (сегмент Пентод).

Сегмент Пентод содержит также три гнезда, позволяющие осуществлять тетродное включение пентода, когда электрически соединённая с анодом третья сетка образует сложный анод. Для этого гнездо U_{C3} следует соединить проводником с гнездом Тетрод ($U_{C3} = U_A$). Для работы в пентодном режиме необходимо соединить гнездо U_{C3} с гнездом Пентод ($U_{C3} = 0$). Здесь также имеются гнёзда U_{C2} для подачи напряжения на вторую (экранную) сетку пентода от внешнего источника сеточного напряжения.

1.4. Начало работы с характеристиографом

Перед началом работы основные органы управления должны быть установлены в **исходные положения**:

1. Экранная панель:

кнопка питания Power – в положение выключено (OFF),
ручки INTEN, FOCUS установить в среднее положение.

2. Поле COLLECTOR SUPPLY:

переключатель MAX PEAK VOLTS в положение 5 В,
кнопки INV, DC отжаты,
ручка VARIABLE COLLECTOR – в положение 0 %,
переключатель SERIES RESISTOR – в положение 250 Ом,
ручки LOOPING, COMPENSATION – в среднее положение.

3. Поле VERTICAL:

кнопки MAG и INV отжаты.

4. Коммутационная панель TEST SET:

кнопка LEFT нажата,
кнопки RIGHT, TRANS, DUAL отжаты.

Перед выполнением измерений, которые представляют собой получение зависимостей токов от напряжений, необходимо установить масштабы по горизонтальной и вертикальной осям (оси напряжений и токов соответственно) на экране, а также начало координат. Эти процедуры, как и действия, которые необходимо произвести для выполнения самих измерений применительно к каждому конкретному объекту исследования, приведены в описаниях соответствующих лабораторных работ.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОТБОРА КАТОДНОГО ТОКА В ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМПАХ

Цель работы: экспериментальное изучение основных законов отбора катодного тока в электронных лампах (диодах и триодах с термокатодами).

2.1. Основные понятия, термины и определения

Катодным током в вакуумных электронных приборах [1] называется ток электронов, эмитированных катодом и преодолевших минимум потенциала вблизи него. Он протекает по выводу катода и может быть измерен с помощью измерителя тока (например, миллиамперметра), включенного в цепь катода. Катодный ток обычно меньше тока эмиссии и, в крайнем случае, равен ему. В диоде (рис. 2.1), где электронный поток распространяется от катода к аноду без потерь электронов, катодный ток численно равен анодному, поэтому закономерности отбора катодного тока можно изучать, анализируя изменения анодного тока.

Если измерить зависимость анодного тока I_a от анодного напряжения U_a при некотором напряжении накала катода U'_n , то ее графическое изображение будет иметь вид кривой, представленной на рис. 2.2, a. Главной особенностью этой кривой, обычно называемой статической анодной характеристикой, является наличие двух

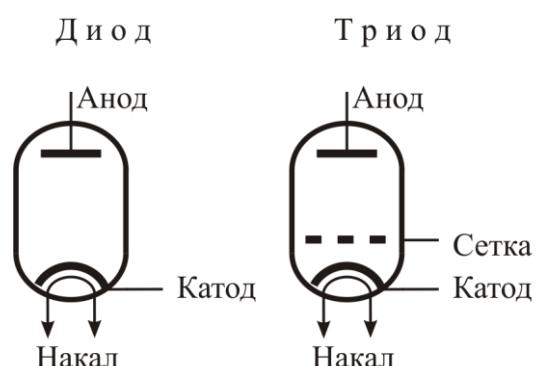


Рис. 2.1

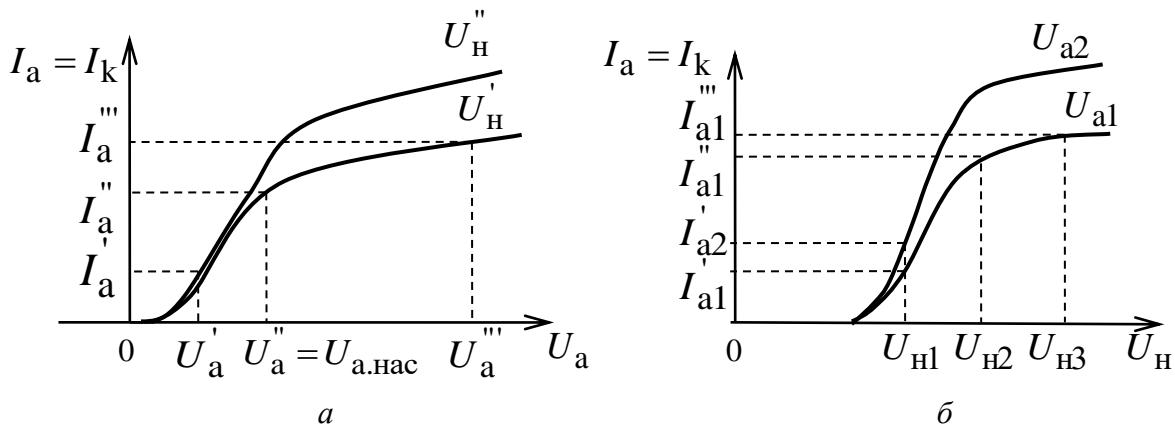


Рис. 2.2

участков с различной крутизной нарастания анодного тока.

Первый участок – крутой. Он соответствует интервалу изменения анодного напряжения $0 \leq U_a \leq U_a'' = U_{a,\text{нас}}$ и тока $0 \leq I_a \leq I_a''$. Второй – пологий, соответствующий неравенству $U_a > U_a''$ и изменению тока от I_a'' до I_a''' . При большем напряжении накала ($U_H > U_H'$) анодная характеристика диода имеет аналогичный вид, но отличается большими значениями анодного тока на пологом участке.

Если измерить зависимость I_a от U_H при двух значениях U_a (например, U_{a1} и $U_{a2} > U_{a1}$), то получим кривые, приведенные на рис. 2.2, б, которые называются эмиссионными характеристиками диода. Эти характеристики похожи на анодные тем, что также имеют два участка – крутонарастающий при $U_H \leq U_{H2}$ и пологий при $U_H > U_{H2}$. Повышение анодного напряжения с U_{a1} до U_{a2} в основном сказывается на повышении уровня тока на пологом участке и меньше влияет на крутизну нарастающего участка.

Объяснение наличия двух участков характеристик с различными законами отбора катодного тока следует искать в специфике электрического поля в диоде. В вакуумном диоде, как и во всяком другом электронном приборе, в общем случае электрические поля создаются двумя источниками: *поверхностными зарядами*, возникающими на электродах при подключении к ним сторонних источников ЭДС, и *пространственными зарядами* – заряженными частицами, возникающими и движущимися между электродами. В диодах с простейшей формой электродов (плоской, цилиндрической, сферической), в которых изменение потенциала является функцией одной координаты, поля поверхностных зарядов легко рассчитать по известным из теории поля фор-

мулам для распределения потенциала между обкладками соответствующих воздушных конденсаторов.

Для иллюстрации качественной стороны распределения потенциалов U_σ , U_ρ и U в идеальном плоском диоде с термокатодом на рис. 2.3 приведены соответствующие кривые для четырех значений анодного напряжения: 0, U_a' , U_a'' и U_a''' , ранее отмеченных на рис. 2.2, а, и напряжения накала U_H' . Здесь катод и анод диода обозначены буквами К и А, расстояние между электродами – x_a . Распределение потенциала U_σ , созданное поверхностными зарядами, показано пунктирными прямыми, одна из которых, соответствующая $U_a = 0$, совпала с осью x . Распределение потенциала, созданное отрицательным пространственным зарядом электронов, показано кривой U_ρ . Результирующее (суммарное) распределение потенциала изображено сплошными кривыми, из которых самая нижняя, соответствующая $U_a = 0$, совпадает с кривой U_ρ .

Из анализа приведенных кривых следует, что в идеальном плоском диоде с накаленным катодом электрическое поле характеризуется нелинейным распределением потенциала. При этом в случае больших положительных анодных напряжений ($U_a \geq U_a''$) все точки межэлектродного пространства будут иметь положительные потенциалы. Если же анодные напряжения невелики ($U_a < U_a''$), то вблизи катода имеется область отрицательных значений потенциала, которая обусловлена нескомпенсированным действием поля пространственного заряда электронов. При этом минимум потенциала U_{\min} оказывается в плоскости, расположенной на расстоянии x_{\min} от катода. Величины U_{\min} и x_{\min} зависят от U_a и U_H . При $U_H = U_{H,\text{ном}}$ и $U_a = 0$ они имеют максимальные значения (U_{\min} – десятые доли вольта, x_{\min} – сотые доли миллиметра). С повышением U_a оба этих значения уменьшаются, достигая нуля при $U_a = U_{a,\text{нас}}$.

В соответствии с указанным характером изменения электрического поля между электродами изменяются и условия отбора катодного тока. При не-

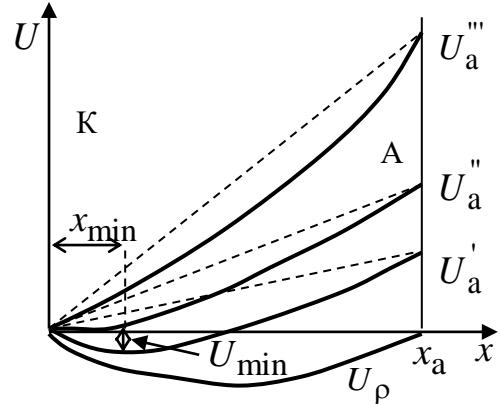


Рис. 2.3

больших анодных напряжения ($U_a < U_{a.\text{нас}}$) область отрицательного потенциала вблизи катода, играющая роль потенциального барьера для эмитированных катодом электронов, снижает катодный ток по сравнению с током эмиссии, поскольку потенциальный барьер смогут преодолеть и составить катодный ток лишь те электроны, у которых энергия, связанная с нормальной составляющей их начальной скорости, $mv_0^2/2 \geq eU_m$. Остальные же электроны, отразившись от барьера, возвращаются на катод. С изменением U_a от нуля до $U_{a.\text{нас}}$ высота барьера меняется от максимального значения до нуля, и вследствие этого катодный ток возрастет от минимального значения до значения, равного эмиссионному току, или току насыщения I_a'' .

Снижение катодного тока по сравнению с током эмиссии, вызванное нескомпенсированным действием поля отрицательного пространственного заряда электронов вблизи катода, получило название эффекта ограничения тока пространственным зарядом электронов, а условия отбора катодного тока при $U_a < U_{a.\text{нас}}$ названы режимом пространственного заряда. Условия отбора катодного тока при $U_a > U_{a.\text{нас}}$, характеризующиеся тем, что поле отрицательного пространственного заряда в диоде полностью скомпенсировано полем положительных поверхностных зарядов, называются режимом насыщения. В этом режиме катодный ток равен току эмиссии и его изменение при помощи анодного напряжения возможно только за счет эффекта Шоттки.

Эффект Шоттки – это увеличение тока эмиссии термокатода под действием внешнего ускоряющего электрического поля вблизи катода, вызванное снижением поверхностного потенциального барьера и, следовательно, понижением работы выхода. На рис. 2.2, *a* эффект Шоттки проявляется на пологом участке анодной характеристики в виде повышения анодного тока от I_a'' до I_a''' при увеличении U_a от U_a'' до U_a''' , а на рис. 2.2, *б* – на нарастающем участке эмиссионных характеристик в виде приращения тока от I_{a1}' до I_{a2}' .

Каждый из рассмотренных режимов отбора катодного тока описывается своим математическим выражением. В режиме пространственного заряда таким выражением в приближенном виде является закон «степени 3/2» $I_K = I_a = GU_a^{3/2}$, где G – первеанс диода, определяемый выражением

$G = 2,33 \cdot 10^{-6} K \left(F_a / x_a^2 \right)$, K – коэффициент формы электродов, $K = 1$ для идеального плоского диода и $K = x_a^2 / \left(r_a^2 \beta_a^2 \right)$ для цилиндрического диода, F_a – действующая поверхность анода, $x_a = r_a - r_k$ – расстояние между анодом и катодом, r_a – радиус анода и β_a^2 – функция отношения r_a к r_k .

Анализ режимов и закономерностей отбора I_k в лампах с сетками показывает, что они аналогичны рассмотренным ранее. Это означает, что отбор I_k в любой лампе с сетками происходит так же, как и в некотором эквивалентном диоде, у которого анод расположен в плоскости первой сетки и имеет потенциал U_{d1} , вызывающий в диоде такой же I_k , какой в реальной лампе вызывает совместное действие потенциалов всех электродов. Поэтому для любой лампы с сетками закон «степени 3/2» имеет вид $I = G_3 U_{d1}^{3/2}$ при условии, что шаг первой сетки h меньше расстояния от нее до катода x_{c1} (т. е.

$$h < x_{c1}). \quad G_3 = 2,33 \cdot 10^{-6} K \frac{F_{c1}}{x_{c1}^2}, \quad U_{d1} = U_d \approx U_c + D U_a \quad (\text{для триодов}),$$

$U_{d1} \approx U_{c1} + D U_{c2} + D_1 D_2 U_a$ (для тетродов и пентодов), где F_{c1} – площадь поверхности сетки; D, D_1, D_2, D_3 – коэффициенты прямой проницаемости сеток; $U_c, U_{c1}, U_{c2}, U_{c3}$ – потенциалы этих сеток.

Обычно, $D = D_1 \approx D_2 = 0,01 \dots 0,05$ и $D_3 = 0,1 \dots 0,2$, поэтому влияние U_a и U_{c3} на U_{d1} и I_k в тетродах и пентодах мало и им часто пренебрегают.

Экспериментальное изучение режимов и законов отбора I_k в конкретных типах электронных ламп с сетками осуществляется, как правило, с помощью различных статических характеристик катодного тока. В триодах (см. рис. 2.1), где $I_k = I_a$ при $U_c \leq 0$, для этих целей могут быть использованы также анодно-сеточные $I_a = f(U_c)$ и анодные $I_a = f(U_a)$ характеристики. Координаты начальных точек этих характеристик будут определяться следующими равенствами: $U_{a0} = -U_c / D$ и $U_{c0} = -D U_a$, что указывает на взаимную параллельность характеристик внутри каждого семейства. Однако на практике характеристики далеко не всегда параллельны. Примером тому являются статические характеристики реального триода (рис. 2.4, 2.5).

Исследования показали, что причиной указанной непараллельности характеристик является «островковый» эффект, сущность которого заключает-

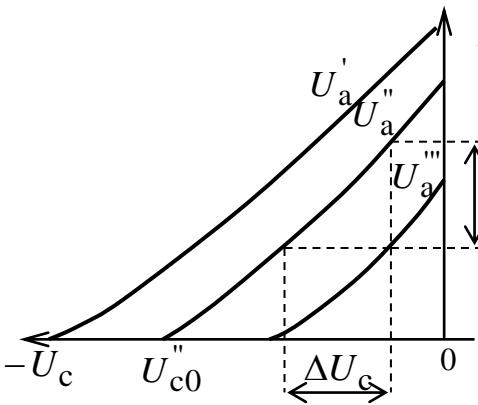


Рис. 2.4

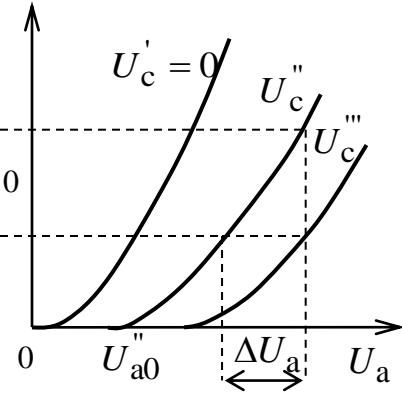


Рис. 2.5

ся в неравномерности отбора электронного тока с поверхности катода, обусловленной неоднородностью ускоряющего электрического поля вдоль этой поверхности. Такое явление наблюдается тогда, когда шаг сетки , т. е. при условии несводимости триода к эквивалентному диоду. При островковом эффекте проницаемость непостоянна. К статическим параметрам диодов и триодов относятся следующие: *внутренняя проводимость лампы по катодному току* $g_{ik} = dI_k / dU_a$ при $U_c = \text{const}$, или обратная ей величина $R_{ik} = 1 / g_{ik}$ – внутреннее сопротивление по катодному току. Значение g_{ik} можно рассчитывать либо аналитически по формуле, получающейся после дифференцирования закона «степени 3/2», либо графоаналитически, используя анодные характеристики ламп и приближенное соотношение $g_{ik} = \Delta I_k / \Delta U_a$, где ΔI_k и ΔU_a – малые приращения катодного тока и анодного напряжения вокруг точки, в которой необходимо найти g_{ik} (рис. 2.5).

Коэффициент управления катодным током в триоде (или крутизна катодно-сеточной характеристики триода) $S_k = dI_k / dU_c$ при $U_a = \text{const}$. Этот коэффициент так же, как и g_{ik} , имеет единицу измерения проводимости и может быть рассчитан либо аналитически, либо графоаналитически с использованием приближенного соотношения $S_k \approx \Delta I_k / \Delta U_c$ при $U_a = \text{const}$ (рис. 2.4). Обычно S_k выражается в единицах проводимости в ампер/вольт или миллиампер/вольт.

Статический коэффициент усиления лампы по катодному току $\mu_k = dU_a / dU_c$ при $I_k = \text{const}$. Аналитический расчет показывает, что $\mu_k = S_k R_{ik}$: по характеристикам этот параметр может быть определен с помощью соотношения $\mu_k \approx \Delta I_a / \Delta U_c$ при $I_k = \text{const}$.

Максимально допустимая мощность рассеяния на аноде $P_{0\max}$. Значение $P_{0\max} = I_a \text{ пред} U_a$ зависит от конструкции анода и определяет собой предельный температурный режим его работы. Для того чтобы при измерениях характеристик лампы не допустить выделение на аноде мощности больше, чем $P_{0\max}$, необходимо следить за тем, чтобы анодный ток не превышал предельного значения $I_a \text{ пред} = P_{a\max} / U_a$.

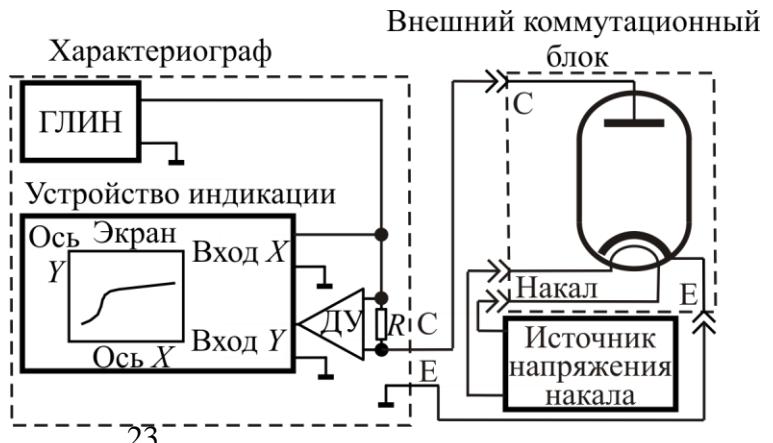
Первеанс электронного потока $p = I_k / U_a^{3/2}$ – параметр, определяющий силы взаимного расталкивания электронов в потоке, вызывающие, в частности, расширение электронного потока. В диоде при отборе I_k в режиме пространственного заряда значение первеанса электронного потока равно значению первеанса диода (т. е. $p = G$), которое не зависит от U_a и определяется только конструктивными размерами диода. В триоде первеанс всегда зависит от потенциала сетки и поэтому может регулироваться в широких пределах.

2.2. Порядок выполнения работы

Перед началом работы установить основные органы управления харктериографа при отключённом питании в **исходные положения** выписать основные справочные данные исследуемых диода и триода [2] и размеры электродов диода. Для проведения исследований:

- Собрать схему для измерений характеристик вакуумного диода (рис. 2.6), для чего соединить проводниками гнёзда С и Е коммутационной панели левого набора гнёзд с гнёздаами С и Е сегмента Диод внешнего коммутационного блока на поле ВЭП.
- Убедиться, что внешний источник переменного накального напряжения отключён от сети и подключить его проводниками к гнёздам Накал поле ВЭП. Перед включением

накального источника рекомендуется установить регулятор (переключатель) его выходного напряжения в положение, соответствующее мини-



мальному напряжению накала.

3. Установить исследуемый диод на ламповую присоединительную панель на поле ВЭП, обращая внимание на необходимость совмещения ключей на цоколе исследуемого прибора и ламповой присоединительной панели.
4. С разрешения преподавателя включить питание харктериографа и источника напряжения накала.
5. Произвести измерения анодных характеристик диода ($I_a = f(U_a)$). Они выполняются поочерёдно для трёх фиксированных значений напряжения накала: 6,3 (номинальное напряжение накала $U_{\text{н.ном}}$); 5; 2,4 В. При переходе от одного напряжения накала к другому необходимо выдержать интервал не менее двух минут между измерениями для установления теплового режима исследуемого прибора. Измерения значений анодных токов следует производить для анодных напряжений $U_a = 0,5; 1; 2; 5; 10; 20; 30; 40$ В... (ориентировочные значения). Предельными значениями токов анода I_a пред и напряжений анода $U_a \text{ max}$ считать 70 мА и 75 В соответственно. Для измерения анодных характеристик, начиная с напряжения накала 6,3 В:

5.1. Ручкой VOLTS/DIV на поле HORIZ установить цену деления по горизонтали $V_{CE} = 10$ В.

5.2. Установить цену деления по вертикали $I_C = 10$ мА на поле VERTICAL с помощью переключателя CURRENT/DIV.

5.3. Нажать кнопку RIGHT на коммутационной панели, чтобы отключить объект исследования от харктериографа, ручками POSITION на полях VERTICAL и HORIZ совместить точку на экране с левым нижним углом координатной сетки на экране харктериографа (начальная точка системы координат, соответствующая нулевым току и напряжению). После этого, нажав кнопку LEFT, вновь подключить объект к харктериографу.

5.4. Установив переключатель MAX PEAK VOLTS в положение 100 В и, медленно увеличивая приложенное к диоду анодное напряжение с помощью ручки VARIABLE COLLECTOR, добиться максимального прямого тока 70 мА (или максимального анодного напряжения 75 В). При необходимости изменить масштаб по горизонтали переключателем VOLTS/DIV на поле HORIZ так, чтобы кривая на экране имела протяжённость не менее 2/3 экрана. Снять кривую $I_a = f(U_a)$ не менее чем по 10 точкам, занося

данные в таблицу. Если с помощью рекомендованных значений U_a невозможно получить 10 точек, следует добавить несколько точек для промежуточных значений U_a .

5.5. Повторить измерение анодных характеристик для других значений напряжения накала, учитывая заданные ограничения по анодному току и напряжению и изменения при необходимости цены делений так, чтобы кривая занимала не менее 2/3 экрана по вертикали и горизонтали.

6. Произвести измерение начальных токов диода. Для этого следует:

6.1. Установить напряжение накала равным 6,3 В.

6.2. Установив регулятор VARIABLE COLLECTOR в положение 0 и переключатель MAX PEAK VOLTS в положение 5 В, отключить диод от характеристиографа, нажав кнопку RIGHT на коммутационной панели.

6.3. Установить цену деления по вертикали $I_C = 0,1$ мА на поле VERTICAL с помощью переключателя CURRENT/DIV и масштаб по горизонтали переключателем VOLTS/DIV на поле HORIZ 0,5 В на деление.

6.4. Совместить точку на экране с левым нижним углом координатной сетки ручками POSITION на полях VERTICAL и HORIZ.

6.5. Восстановить подключение диода к характеристиографу, нажав кнопку LEFT на коммутационной панели.

6.6. Медленно изменяя анодное ручкой VARIABLE COLLECTOR напряжение, добиться пересечения графика анодной характеристики диода с левой вертикальной прямой основной координатной сетки на экране. Ток анода, соответствующий точке пресечения (т. е. при нулевом напряжении на аноде), является начальным током диода при данном напряжении накала. Зафиксировать его.

6.7. Повторить п. 6.6 при других напряжениях накала (5; 3,8; 2,4; 1,2 В), выдерживая двухминутные интервалы при переходе от одного напряжения накала к другому. При возможном развоении кривой на экране минимизировать данный эффект ручками LOOPING и COMPENSATION на поле COLLECTOR SUPPLY.

7. Измерить эмиссионные характеристики диода $I_a = f(U_H)$ при двух значениях U_a , т. е. U_{a1} и U_{a2} (10 и 20 В). Измерение зависимостей I_a от U_H следует производить для $U_H = 1,2; 2,4; 3,8; 5; 6,3$ В. При этом, выставив очередное значение U_H и дав установиться тепловому режиму катода, нужно измерить ток I_a как при меньшем U_{a1} , так и при большем U_{a2} зна-

чениях U_a , после чего можно переходить к следующему значению U_H .

Для измерения эмиссионных характеристик:

7.1. Установить цену деления по вертикали $I_C = 10 \text{ mA}$ на поле VERTICAL с помощью переключателя CURRENT/DIV и анодное напряжение с помощью ручки VARIABLE COLLECTOR равным нулю.

7.2. Переключателем VOLTS/DIV на поле HORIZ установить цену деления по горизонтали V_{CE} , равную 2 В.

7.3. Установить переключатель MAX PEAK VOLTS в положение 5 В и, отсоединив диод от характеристографа нажатием кнопки RIGHT, совместить точку на экране с левым нижним углом координатной сетки ручками POSITION на полях VERTICAL и HORIZ. Восстановить подключение диода, нажав кнопку LEFT.

7.4. Установить требуемое значение напряжения накала.

7.5. Установить переключатель MAX PEAK VOLTS в положение 100 В и с помощью ручки VARIABLE COLLECTOR установить протяжённость анодной характеристики по горизонтали, равную 20 В (10 делений).

7.6. Установить такую цену деления по вертикали с помощью переключателя CURRENT/DIV, чтобы кривая занимала по вертикали от пяти до десяти делений координатной сетки.

7.7. Измерить значения анодного тока для данного напряжения накала при двух значениях анодного напряжения (10 и 20 В).

7.8. Установить следующее значение напряжения накала и, выждав две минуты для установления теплового режима диода, повторить измерения. Измерения проводятся для всех напряжений накала, указанных в п.7.

8. Предварительно установив органы управления характеристографа в исходные положения, и убедившись, что все источники питания выключены, собрать схему, представленную на рис. 2.7 (здесь ГСН – генератор ступенчатого напряжения), для измерения характеристик триода:

8.1. Соединить проводниками гнёзда С, В и Е коммутационной панели левого набора гнёзд с гнёздами С, В и Е сегмента Триод внешнего коммутационного блока на поле ВЭП.

8.2. Убедившись, что он отключён от сети, подключить внешний источник переменного напряжения накала проводниками к гнёздам Накал на поле ВЭП. Установить переключатель выходного напряжения источника в положение $U_H = 6,3 \text{ В}$.

8.3. Установить исследуемый триод на ламповую присоединительную па-

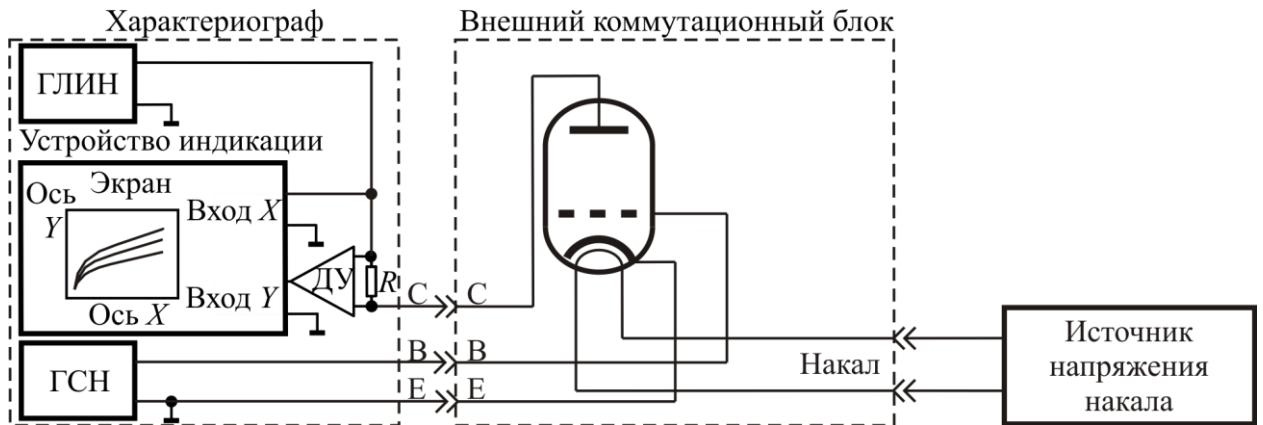


Рис. 2.7

нель на поле ВЭП с использованием переходного соединителя, обращая внимание на необходимость совмещения ключей исследуемого прибора, переходного соединителя и ламповой присоединительной панели внешнего коммутационного блока (см. рис. 1.10).

8.4. С разрешения преподавателя включить питание харктериографа.

9. Измерить анодные характеристики триода $I_a = f(U_a)$, для чего:
 - 9.1. Установить цену деления по вертикали $I_C = 2 \text{ mA}$ на поле VERTICAL с помощью переключателя CURRENT/DIV.
 - 9.2. Установить переключатель VOLTS/DIV в положение 20 В.
 - 9.3. Установить анодное напряжение с помощью ручки VARIABLE COLLECTOR равным нулю при переключателе MAX PEAK VOLTS в положении 5 В и, нажав для отключения объекта исследования от харктериографа кнопку RIGHT на коммутационной панели, совместить точку на экране с левым нижним углом координатной сетки ручками POSITION на полях VERTICAL и HORIZ. После этого восстановить подключение объекта, нажав кнопку LEFT.
 - 9.4. Установить переключатель VOLTS/DIV на поле HORIZ в положение .
 - 9.5. Установить переключатель STEP/OFFSET AMPL на поле STEP GENERATOR в положение 0,5 В, переключатель SERIES RESISTORS в положение 1K и переключатель 25 полярности генератора (см. рис. 1.5) в положение  (нажато – отрицательная полярность). Регулятор NUMBER OF STEPS на этом же поле установить в крайнее против часовой стрелки положение.
 - 9.6. Совместить правую из точек на нижней горизонтальной прямой координатной сетки на экране с крайней левой вертикальной линией основной

сетки, которой соответствует нулевой потенциал, с помощью ручки OFF-SET на поле STEP GENERATOR. При этом на сетку подаётся пятиступенчатое напряжение с напряжениями ступеней 0; -0,5; -1; -1,5; -2 В, каждому из которых соответствует своя анодная (выходная) характеристика.

9.7. Вернуть переключатель VOLTS/DIV в положение 20 В.

9.8. Включить питание источника напряжения накала.

9.9. Переключателем MAX PEAK VOLTS выбрать предел выходного напряжения харктериографа 500 В (регулятор VARIABLE COLLECTOR должен находиться в положении 0).

9.10. Увеличивая выходное напряжение харктериографа с помощью регулятора VARIABLE COLLECTOR, добиться достижения одного из ограничений для данного измерения – либо 18 мА анодного тока (9 делений по вертикали для выбранного предела $I_C = 2$ мА), либо 150 В анодного напряжения (7,5 делений по горизонтали для выбранного предела 20 В/деление). На экране при этом имеется семейство из пяти анодных характеристик, верхняя из которых соответствует потенциальну сетки, равному нулю, нижняя соответствует -2 В.

9.11. Произвести измерение анодных характеристик, занести результаты в таблицу. На каждую кривую должно приходиться 8–10 точек. Наиболее часто точки на кривых следует располагать в областях с наибольшей кривизной характеристик. По разрешению преподавателя могут быть измерены не все наблюдаемые анодные характеристики, а первая, третья и пятая.

10. Измерить анодно-сеточные характеристики триода $I_a = f(U_c)$ при трех значениях U_a (50 ; 100 ; 150 В), изменения U_c от нуля до потенциала запирания, для чего:

10.1. Не изменяя настроек харктериографа, произведённых в рамках п. 9 (или повторив их), установить переключатель SERIES RESISTOR на поле COLLECTOR SUPPLY в положение 2,5 Ом. При этом горизонтальная протяжённость каждой из кривых семейства анодных характеристик будет одинаковой, что соответствует одному и тому же максимальному анодному напряжению для каждой из кривых.

10.2. Ручкой VARIABLE COLLECTOR установить максимальное анодное напряжение равным одному из значений U_a , требуемых для проведения измерений.

10.3. Переключатель VOLTS/DIV на поле HORIZ установить в положение . При этом на экране наблюдается ряд вертикальных линий, которым

соответствуют установленные в пп. 9.5 и 9.6 сеточные потенциалы (справа налево) 0; -0,5; -1; -1,5; -2 В. Верхние точки этих линий соответствуют точкам на анодно-сеточной характеристике для выбранного U_a .

10.4. Ручкой POSITION на поле HORIZ переместить изображение на экране вправо так, чтобы были видны все вертикальные прямые, и, при необходимости, увеличить их количество ручкой NUMBER OF STEPS, чтобы анодно-сеточная характеристика дошла до нулевых значений анодного тока, т. е. до напряжения запирания. Значения потенциалов сетки, соответствующих добавленным линиям, можно определить, зная, что каждая линия имеет потенциал на 0,5 В меньший, чем линия, находящаяся вправо от неё. Занести значения токов и напряжений, соответствующих вершинам вертикальных линий, образующих анодно-сеточную характеристику, в таблицу зависимости I_a от U_c .

10.5. Установив регулятор VARIABLE COLLECTOR в положение 0, переключатель VOLTS/DIV на поле HORIZ в положение 20 В и ручку NUMBER OF STEPS в крайнее против часовой стрелки положение, повторить пп. 10.1 – 10.4 для других значений U_a .

11. Используя измеренную анодную характеристику диода, рассчитать зависимость первеанса p от U_a и в виде кривой изобразить ее на графике анодной характеристики диода. Там же пунктирной кривой изобразить теоретическую зависимость p от U_a .

12. На рабочих участках измеренных характеристик триода рассчитать статические параметры S_k , R_{ik} и μ_k ; определить зависимость коэффициента проницаемости D от U_c , изобразив ее на графике анодно-сеточной характеристики и экстраполировав ее до значения $U_c = 0$.

13. Используя анодные характеристики триода (п. 2.2) и кривую $D = f(U_c)$ (п. 2.5), рассчитать для каждого значения U_c зависимость первеанса p от действующего потенциала U_d ; полученные зависимости в виде кривых изобразить на графике анодных характеристик.

2.3. Контрольные вопросы и задания

1. Что такое «катодный ток» в электронных лампах, и чем он отличается от тока эмиссии и анодного тока в этих лампах?

2. Изобразите на графике статические характеристики диода и укажите на нем режимы отбора катодного тока.

3. Что такое эффект Шоттки, и на каких участках статических характеристик диода он проявляется?

4. Из каких составляющих складывается электрическое поле в вакуумном диоде с накаленным катодом? Приведите кривые распределения соответствующих потенциалов в межэлектродном пространстве диода.

5. Дайте определения понятиям «эквивалентный диод» и «действующий потенциал». Приведите выражения для действующего потенциала.

6. Изобразите семейства катодно-сеточных и катодно-анодных статических характеристик триода.

7. Какими законами описываются режимы отбора катодного тока в диодах и триодах? Приведите их.

8. Что такое «островковый эффект», при каких условиях он возникает и как проявляется на статических характеристиках?

10. Что такое первеанс, и как он зависит от анодного напряжения лампы? Изобразите эту зависимость на одном графике с анодной характеристикой диода.

11. Какие причины вызывают отклонения реальных характеристик ламп от расчетных? Как изменятся анодные характеристики диода (см. рис. 12, а), если в нем ухудшится вакуум?

3. ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМПАХ С СЕТКАМИ

Цель работы: исследование режимов и характеристик токораспределения в различных типах электронных ламп.

3.1. Основные понятия, термины и определения

Многие режимы работы триодов (см. рис. 2.1) и других многоэлектродных ламп, две из которых представлены на рис. 3.1, предусматривают подачу положительных потенциалов, по крайней мере, на два электрода – анод и одну из сеток. В связи с этим поток электронов, движущийся от катода к аноду, частично оседает на положительно заряженной сетке. Такой процесс получил

название процесса токораспределения в лампе. Анализ различных вариантов

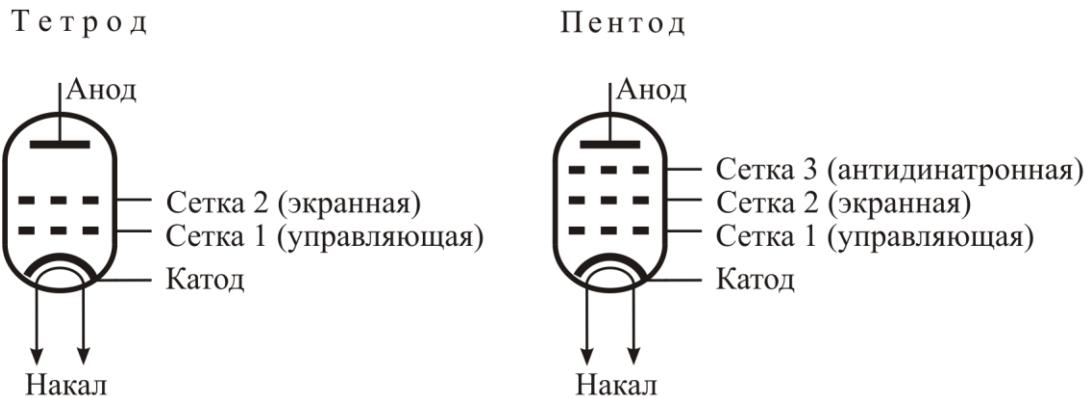


Рис. 3.1

(случаев) токораспределения в лампах с сетками показал, что все они могут рассматриваться как повторения или сочетания двух простейших случаев: токораспределения между двумя соседними электродами, например, в триоде – между сеткой и анодом, в тетроде – между экранирующей сеткой и анодом, и токораспределения между двумя электродами, разделенными третьим (сеткой) с нулевым или с отрицательным потенциалом, например, в пентоде – между экранной сеткой и анодом при потенциале третьей (антидинастроной) сетки $U_{c3} = 0$.

В любом из этих простейших случаев процесс токораспределения можно характеризовать двумя основными параметрами: коэффициентом токопрохождения $\delta = I_a / I_k$ и коэффициентом токораспределения $\kappa = I_a / I_c$. Учитывая, что катодный I_k , анодный I_a и сеточный I_c токи связаны между собой равенством $I_k = I_a + I_c$, легко показать, что $\delta = \kappa / (1 + \kappa)$, $\kappa = \delta / (1 - \delta)$.

Возьмем, например триод, и измерим зависимости I_a и I_c от U_a при двух значениях $U_c > 0$. На рис. 3.2 приведены графические изображения данных зависимостей: сплошными линиями показаны анодные характеристики

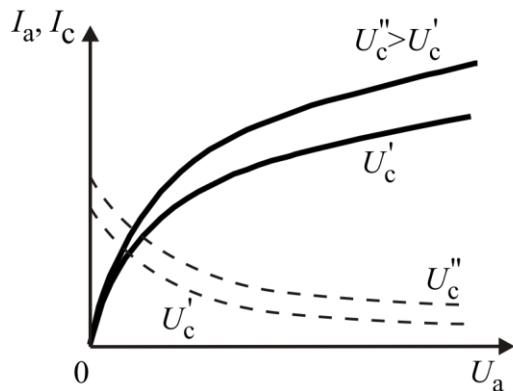


Рис. 3.2

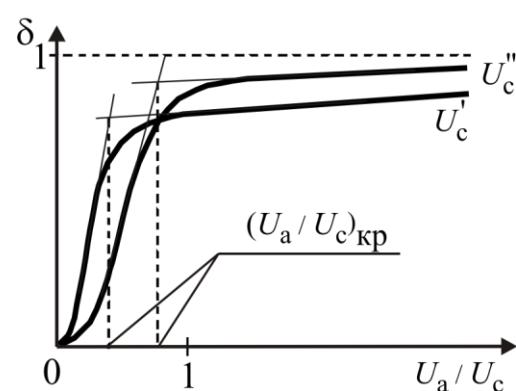


Рис. 3.3

стики, пунктирными – сеточно-анодные. Если по этим характеристикам рассчитать и построить зависимости δ от U_a / U_c , то полученные кривые будут иметь вид, приведенный на рис. 3.3. Для этих кривых характерным является наличие двух участков с разными законами изменения δ . Переход от одного участка к другому происходит плавно, поэтому величина $(U_a / U_c)_{kp}$ определяется как проекция точки пересечения касательных, проведенных к каждому из двух участков кривой δ , на ось абсцисс. Из рис. 3.3 также видно, что точка перегиба кривой δ , соответствующей U_c'' , сдвинута в сторону больших значений U_a / U_c по сравнению с перегибом кривой при U_c' .

Для объяснения отмеченных особенностей кривых на рис. 3.3 обратимся к картинам электрических полей и траекторий в триоде. На рис. 3.4 приведены фрагменты плоского триода, представляющие собой триодные ячейки, одинаковые по геометрическим размерам, но различающиеся картинами электрических полей и траекторий, полученными при разных потенциалах сетки ($a - 1$ В; $b - 3,5$ В; $c - 6$ В; $d - 20$ В) и неизменном потенциале анода 10 В. Эквипотенциали поляй показаны точечными, а траектории – штриховыми линиями: участки поверхности катода, с которых электроны попадают на сетку, выделены жирными линиями.

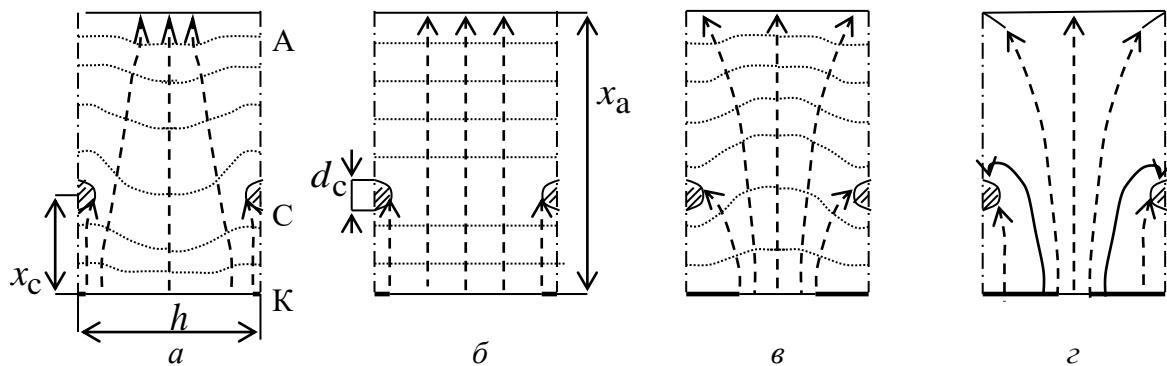


Рис. 3.4

На рис. 3.4, b потенциал сетки 3,5 В выбран равным «естественному» потенциалу $U_c = U_{ce}$, т. е. потенциальному, при котором картина электрического поля в триоде сохраняется такой же, какой она была в исходном диоде до помещения в него сетки. В этом случае электроны летят от катода к аноду по прямым линиям и на сетку попадают лишь те из них, которые вышли с участков катода, расположенных непосредственно под витками сетки. При этом

$\delta_e = \frac{I_a}{I_k} = 1 - \frac{d_c}{h} = 1 - \sigma_c; \quad \kappa_e = \frac{I_a}{I_c} = \frac{h}{d_c} - 1 = \frac{1}{\sigma_c} - 1$, где $\sigma_c = d_c/h$ – коэффициент заполнения поверхности сетки проволокой. Типичными значениями являются $\sigma_c = 0,15...0,3$.

Снижение потенциала сетки $U_c < U_{ce}$ вызывает провисание эквипотенциалей к катоду (рис. 3.4, *a*), фокусировку потока электронов и уменьшение поверхности катода, с которой выходят электроны, попадающие на сетку. Коэффициенты δ и κ при этом растут. При $U_c > U_{ce}$ возникает провисание эквипотенциалей в сторону анода (рис. 3.4, *в*), расфокусировка электронного потока и κ увеличение поверхности катода, с которой выходят электроны, перехватываемые сеткой. Коэффициенты δ и κ при этом уменьшаются.

Таким образом, при отклонении U_c от U_{ce} в ту или в иную сторону в пределах $0 < U_c < U_a$ токораспределение изменяется вследствие линзового эффекта ячеек сетки, проявляющегося в фокусировке или в расфокусировке электронов и приводящего к некоторому отклонению значений δ и κ от δ_e и κ_e , зависящих только от коэффициента заполнения сетки. Режим токораспределения, при котором сила сеточного тока в основном определяется электронами, перехватываемыми сеткой при их движении к аноду (прямое направление движения), получил название режима *прямого перехвата*.

Если напряжение на сетке достигнет или даже превзойдет значение анодного напряжения $U_c \geq U_a$, то поле в области сетки сильно исказится. Это приведет к резкому преломлению траекторий большой части электронов (рис. 3.4, *г*), пролетающих сквозь сетку вблизи витков, что не позволит им достичь анода. Такие электроны возвращаются назад, к сетке, и либо сразу попадают на ее витки, либо, пролетев сквозь сетку и описав циклическую траекторию, попадают на нее снизу. Режим токораспределения, при котором сеточный ток определяется в основном электронами, возвращающимися из области анода, получил название *режима возврата*.

Условная граница режимов токораспределения определяется значением $(U_a/U_c)_{kp}$ (см. рис. 3.3). Слева от этой границы преобладает режим возврата, справа – режим прямого перехвата. Положение границы зависит от ряда факторов, в том числе от силы тока I_k . При увеличении I_k в межэлектродном пространстве возрастает отрицательный пространственный заряд, снижается действующий потенциал и происходит дополнительная расфокуси-

ровка электронного потока. Процесс увеличения тока, таким образом, усиливает влияние режима возврата на токораспределение, что проявляется в смещении равновесной границы между режимами $(U_a / U_c)_{kp}$ в сторону больших значений.

Введение в триод экранной сетки C_2 между анодом и управляющей сеткой C_1 и переход к тетроду обеспечивают экранировку управляющей сетки от переменного поля анода и, таким образом, повышают рабочую частоту и коэффициент усиления ламповых усилителей. Для обеспечения необходимой силы катодного тока на экранную сетку должен быть подан постоянный положительный потенциал $U_{c2} = (0,2...0,5)U_a$. При $U_{c1} \leq 0$ распределение катодного тока происходит между экранной сеткой и анодом. При потенциалах анода $U_a > U_{c2}$ в тетроде существует режим прямого перехвата, аналогичный триодному. Коэффициенты δ и κ так же, как и в триоде, зависят от геометрии электродов и отношения потенциалов U_a / U_{c2} . В режиме возврата $U_a < U_{c2}$ процесс токораспределения в тетроде усложняется. Электроны, эмитированные катодом, выбиваются из анода вторичные электроны, которые при $U_a < U_{c2}$ направляются на экранную сетку C_2 . В результате анодный ток будет определяться разностью токов первичных I_a' и вторичных I_a'' электронов, а ток экранной сетки $I_{c2} = I_{c2}' + I_{a''}$, где I_{c2}' – ток первичных электронов экранной сетки. Описанный эффект называется *анодным динатронным эффектом*.

На статических характеристиках тетрода (рис. 3.5, а) этот эффект проявляется в виде провала на кривой анодного тока (сплошная). Таким же образом искажаются и графики зависимостей: $\delta = f_\delta(U_a / U_{c2})$, $\kappa = f_\kappa(U_a / U_{c2})$. Для подавления динатронного эффекта в тетродах между анодом и экранной

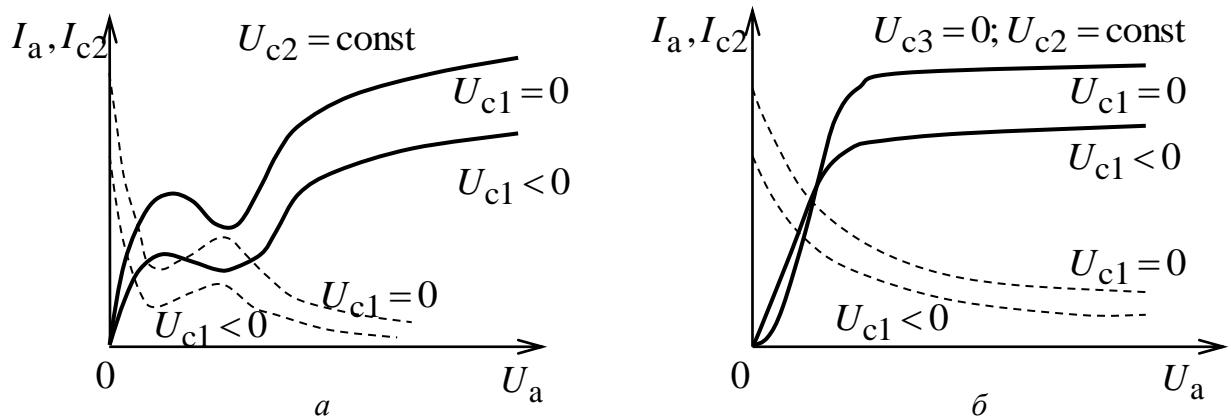


Рис. 3.5

сеткой размещается третья, антидинатронная сетка, превращающая тетрод в пятиэлектродную лампу – пентод. При потенциале третьей сетки, близком к нулю, между анодом и экранной сеткой пентода образуется потенциальный барьер, не допускающий перехода вторичных электронов, обладающих малыми энергиями, с анода на экранную сетку и, следовательно, возникновения динатронного эффекта. Одновременно этот потенциальный барьер сдвигает границу перехода от одного режима токораспределения к другому в сторону больших значений U_a / U_{c2} . Описанный механизм действия антидинатронной сетки иллюстрируется статическими характеристиками пентода (рис. 3.5, б).

3.2. Порядок выполнения работы

1. Выписать из справочника [2] данные, относящиеся к исследуемым электронным лампам.
2. Предварительно установив основные органы управления харктериографа в **исходные положения**, собрать схему измерений для исследования процессов токораспределения в триоде, представленную на рис. 3.6.

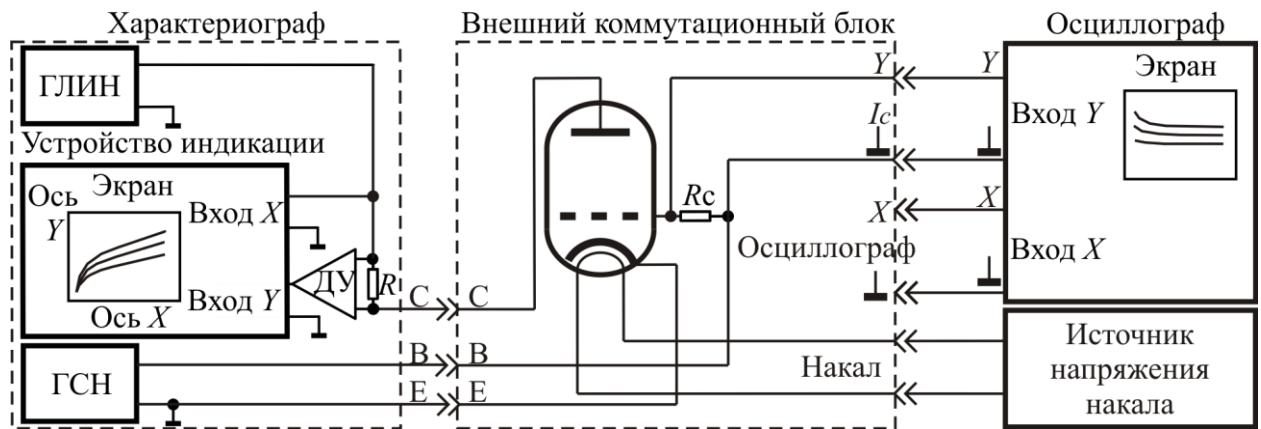


Рис. 3.6

Здесь R_c – резистор, включённый в сеточную цепь, который необходим для определения силы сеточного тока. Сопротивление резистора, необходимое при вычислениях, составляет 10 Ом. Падение напряжения на нём прикладывается к входу Y осциллографа, определяя вертикальное отклонение точки на экране. Одновременно с этим на вход горизонтального отклонения луча X поступает напряжение, пропорциональное анодному напряжению (подаваемому на гнездо С харктериографа). Таким образом, на экране ос-

циллографа прочерчивается кривая, положение каждой точки которой в любой момент времени пропорционально анодному напряжению и сеточному току (падению напряжения на резисторе R_c) – сеточно-анодная характеристика. Самой левой точке по горизонтали соответствует нулевое анодное напряжение, самой правой – максимальное анодное напряжение, поданное на анод характеристиографом. Одновременно с сеточно-анодной характеристикой на экране характеристиографа отображается анодная характеристика.

Для того чтобы собрать измерительную схему:

- 2.1. Соединить проводниками гнёзда С, В и Е коммутационной панели левого набора гнёзд с гнёздами С, В и Е сегмента Триод внешнего коммутационного блока на поле ВЭП.
- 2.2. Соединить проводниками выход источника переменного накального напряжения с гнёздами Накал поля ВЭП внешнего коммутационного блока, предварительно удостоверившись в том, что источник отключён от сети.
- 2.3. Установив переключатель режима горизонтальной развёртки осциллографа в положение $\oplus X$, при котором отключается внутренний генератор развёртки и появляется возможность внешнего управления горизонтальным перемещением электронного луча по экрану, соединить проводниками гнёзда Осциллограф на поле ВЭП с гнёздами входа канала горизонтального отклонения луча осциллографа X. При этом необходимо, чтобы гнездо входа X осциллографа, обозначенное символом , было соединено с аналогичным гнездом на поле ВЭП.
- 2.4. Установить исследуемый триод на внешний коммутационный блок с помощью переходного соединителя (рис. 1.10).
- 2.5. Подключить вход Y осциллографа к гнёздам I_C сегмента Триод так, чтобы экранирующая оплётка кабеля осциллографа («общий» провод) была соединена с гнездом, обозначенным символом .
- 2.6. С разрешения преподавателя включить питание осциллографа, источника напряжения накала и характеристиографа.
- 2.7. Установить напряжение накала равным 6,3 В.
3. Измерить статические характеристики $I_a = f_a(U_a)$ (анодная характеристика), $I_c = f_c(U_a)$ (сеточно-анодная характеристика):
 - 3.1. Установить переключатель CURRENT /DIV на поле VERTICAL в положение 2 mA.

3.2. Установить переключатель VOLTS/DIV на поле HORIZ в положение 10 В.

3.3. Нажать кнопку RIGHT на коммутационной панели, чтобы отключить объект исследования от харктериографа, ручками POSITION на полях VERTICAL и HORIZ совместить точку на экране с левым нижним углом координатной сетки на экране харктериографа (начальная точка системы координат, соответствующая нулевым току и напряжению). После этого, нажав кнопку LEFT, вновь подключить объект к харктериографу.

3.4. Переключатель STEP/OFFSET AMPL установить в положение 1 В, а регулятор NUMBER OF STEPS установить в крайнее против часовой стрелки положение.

3.5. Установить переключатель полярности выходных импульсов генератора 25 (см. рис. 1.5) на поле STEP GENERATOR в положение □ (отжато – положительная полярность напряжения на сетке).

3.6. Установив переключатель VOLTS/DIV на поле HORIZ в положение , совместить по горизонтали крайнюю левую точку на экране с крайней левой вертикальной линией основной координатной сетки ручкой OFFSET. При этом крайней левой точке соответствует нулевой потенциал сетки, остальным четырём – положительные потенциалы 1; 2; 3; 4 В соответственно.

3.7. Вернув переключатель VOLTS/DIV в положение 10 В, медленно увеличивать анодное напряжение ручкой VARIABLE COLLECTOR на пределе переключателя MAX PEAK VOLTS 100 В. Добиться достижения анодным током значения 18 мА или анодным напряжением – 150 В. При этом на экране харктериографа отображается семейство из пяти анодных харктеристик, нижняя из которых соответствует 0 В на сетке, верхняя – +4 В. На экране осциллографа имеется семейство сеточно-анодных харктеристик, нижняя из которых соответствует 0 В на сетке, верхняя – +4 В. По горизонтальной оси крайним левым точкам на экране осциллографа соответствует нулевое анодное напряжение, крайним правым – максимальное анодное напряжение, поданное на прибор харктериографом (может быть определено по экрану харктериографа). В случае если горизонтальная протяжённость кривых на экране осциллографа не равна горизонтальной протяжённости координатной сетки, следует установить их равенство с помощью потенциометра Калибровка X. Для перемещения и масштабирования кривых на экране осциллографа следует использовать его органы

управления – ручки вертикального и горизонтального перемещений и переключатель чувствительности канала вертикального отклонения луча Y .

3.8. Произвести измерения анодных и сеточно-анодных характеристик, занося результаты измерений в таблицу. Рекомендуется измерить для каждой кривой 8-10 точек, расставляя их наиболее часто в областях с большей кривизной зависимостей.

4. Установив основные органы управления харктериографа в исходные положения и отключив источник накального напряжения, собрать схему измерений для тетрода (рис. 3.7):

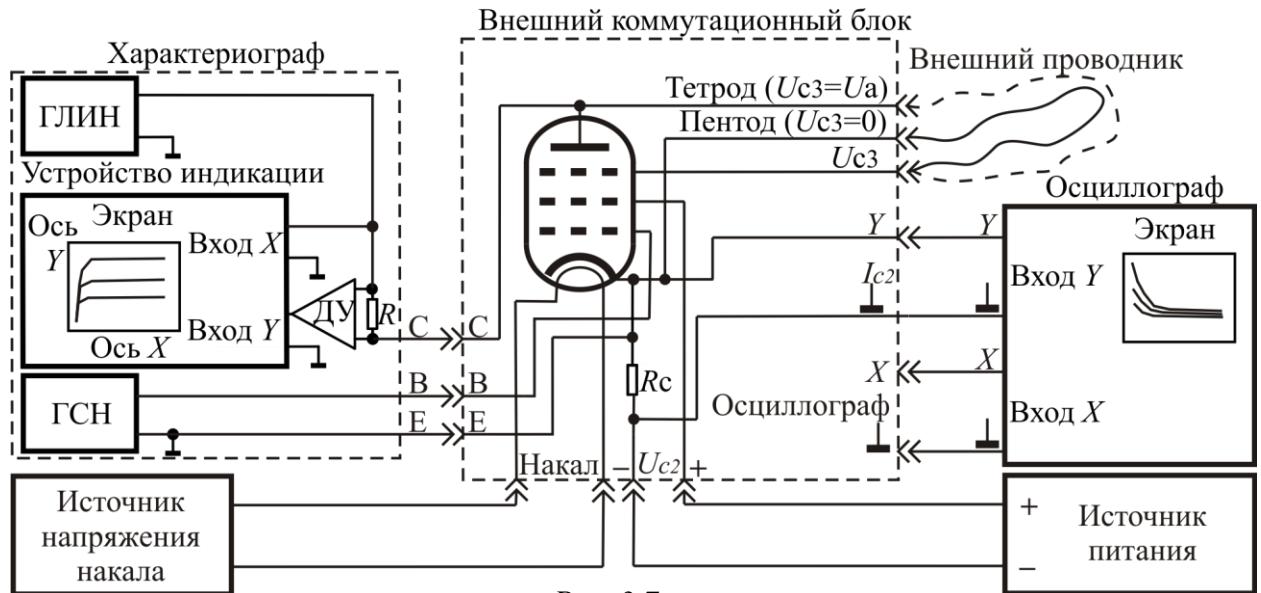


Рис. 3.7

4.1. Соединить проводниками гнёзда С, В и Е коммутационной панели левого набора гнёзд с гнёздами С, В и Е сегмента Пентод внешнего коммутационного блока на поле ВЭП.

4.2. Соединить проводниками выход источника переменного накального напряжения с гнёздами Накал поля ВЭП внешнего коммутационного блока.

4.3. Установив переключатель режима горизонтальной развёртки осциллографа в положение ΘX , при котором отключается внутренний генератор развёртки и появляется возможность внешнего управления горизонтальным перемещением электронного луча по экрану, соединить проводниками гнёзда Осциллограф на поле ВЭП с гнёздами входа канала горизонтального отклонения луча осциллографа X. При этом необходимо, чтобы гнездо входа X осциллографа, обозначенное символом \perp , было соединено с аналогичным гнездом на поле ВЭП.

4.4. Подключить вход канала вертикального отклонения луча осциллографа Y к гнёздам I_{C2} сегмента Пентод коммутационного блока. При этом провод, маркированный символом , должен быть соединён с гнездом, имеющим аналогичную маркировку.

4.5. Установить исследуемый пентод на внешний коммутационный блок, обратив внимание на совмещение ключей на цоколе лампы и на присоединительной ламповой панели.

4.6. Удовствовавшись, что он отключён от сети, подключить внешний источник напряжения экранной сетки, для чего соединить проводниками выход источника питания (рис. 3.7) с гнёздами U_{C2} на внешнем коммутационном блоке, соблюдая указанную на лицевой панели коммутационного блока полярность. Установить регуляторы его выходного напряжения в положение минимального напряжения.

4.7. Для реализации тетродного включения пентода соединить проводником гнёзда Тетрод $U_{C3} = U_a$ и U_{C3} (соединение показано пунктиром). При этом третья сетка электрически соединяется с анодом, образуя сложный анод.

4.8. С разрешения преподавателя включить питание осциллографа, внешнего источника напряжения накала и харктериографа.

4.9. Установить напряжение накала равным 6,3 В.

4.10. Установить напряжение на экранной сетке с помощью внешнего источника равным 100 В.

5. Измерить статические характеристики $I_a = f_a(U_a)$; $I_{c2} = f_c(U_a)$, для чего следует:

5.1. Установить переключатель полярности выходных импульсов генератора 25 на поле STEP GENERATOR в положение  (нажато – отрицательная полярность напряжения на сетке).

5.2. Установить переключатель CURRENT/DIV на поле VERTICAL в положение 2 мА.

5.3. Установить переключатель VOLTS/DIV на поле HORIZ в положение 20 В.

5.4. Нажать кнопку RIGHT на коммутационной панели, чтобы отключить объект исследования от харктериографа. Ручками POSITION на полях VERTICAL и HORIZ совместить точку на экране с левым нижним углом координатной сетки на экране харктериографа (начальная точка системы

координат, соответствующая нулевым анодному току и напряжению). После этого, нажав кнопку LEFT, вновь подключить объект.

5.5. Переключатель STEP/OFFSET AMPL установить в положение 1 В.

5.6. Регулятор NUMBER OF STEPS установить в крайнее против часовой стрелки положение.

5.7. Установив переключатель VOLTS/DIV на поле HORIZ в положение , совместить по горизонтали крайнюю правую точку на экране с крайней левой вертикальной линией основной координатной сетки с помощью ручки OFFSET. При этом крайней правой точке соответствует нулевой потенциал сетки, остальным четырём – отрицательные потенциалы -1 ; -2 ; -3 ; -4 В соответственно.

5.8. Вернув переключатель VOLTS/DIV в положение 20 В, медленно увеличивать анодное напряжение ручкой VARIABLE COLLECTOR на пределе переключателя MAX PEAK VOLTS 500 В. Добиться достижения анодным напряжением значения 200 В. При этом на экране харктериографа отображается семейство из пяти анодных характеристик тетрода, верхняя из которых соответствует 0 В на сетке, нижняя -4 В. На экране осциллографа имеется семейство сеточно-анодных характеристик, верхняя из которых соответствует 0 В на сетке, нижняя -4 В. По горизонтальной оси крайним левым точкам на экране осциллографа соответствует нулевое анодное напряжение, крайним правым – максимальное анодное напряжение, поданное на прибор харктериографом (может быть определено по экрану харктериографа). В случае, когда горизонтальная протяжённость кривых на экране осциллографа не равна десяти делениям его координатной сетки, откорректировать её с помощью потенциометра Калибровка X внешнего коммутационного блока.

5.9. Произвести измерения анодных и сеточно-анодных характеристик тетрода, занести результаты измерений в таблицу. Рекомендуется измерить для каждой кривой не менее 10 точек, расставляя их наиболее часто в областях с большей кривизной зависимостей. По разрешению преподавателя могут быть измерены первая, третья и пятая анодные и сеточно-анодные характеристики.

6. Предварительно установив органы управления харктериографа в исходные положения, собрать схему измерений для пентода (рис. 3.7), отличающуюся от тетродной потенциалом третьей (антидинатронной) сетки. В схеме для пентода её необходимо подключить к катоду, соединив внешним

проводником гнёзда Пентод ($U_{C3}=0$) и U_{C3} (соединение показано сплошной линией). При этом на третью сетку подаётся отличный от анодного потенциал, равный нулю. Повторить для пентода действия, описанные в пп. 5.1–5.9.

7. По экспериментальным данным построить графики статических характеристик отдельно для триода, для тетрода и для пентода.
8. По экспериментальным данным определить зависимости $\delta = f_\delta(U_a / U_c)$ для заданных значений U_{c1} , U_{c2} и построить графики функций $\delta = f_\delta(U_a / U_c)$ отдельно для триода, для тетрода и для пентода. Для тетрода и пентода считать $U_c = U_{c2}$. Определить границы режимов токораспределения $(U_a / U_c)_{kp}$.

3.3. Контрольные вопросы и задания

1. При каком условии в электронных лампах возникает процесс токораспределения?
2. Назовите и определите режимы токораспределения.
3. Какими параметрами характеризуется процесс токораспределения, и от чего они зависят?
4. Каким образом на режимы токораспределения влияет пространственный заряд электронного потока?
5. Что такое динатронный эффект, и при каких условиях он возникает?
6. Каким образом можно избавиться от динатронного эффекта?
7. Как влияет антидинатронная сетка на токораспределение в пентоде?

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

Цель работы: изучение наиболее характерных свойств электронно-дырочного перехода при его работе в режиме выпрямления, при электрическом пробое и при возникновении туннельного эффекта.

4.1. Основные теоретические положения

Электронно-дырочный переход [3] является основой полупроводниковых приборов, применяемых для преобразования, усиления и генерирования

электрических сигналов. Широкий диапазон изменения электрических свойств перехода в зависимости от используемых полупроводниковых материалов, степени их легирования и технологии изготовления позволяет создавать различные типы полупроводниковых диодов, среди которых наибольшее распространение получили выпрямительные диоды, стабилитроны, туннельные диоды, вариакапы и др.

Наиболее широкое распространение получили электронно-дырочные переходы, образующиеся в полупроводниковых структурах с двумя различными видами проводимости. Различная концентрация однотипных подвижных носителей заряда в *p*- и *n*-областях приводит к диффузии электронов из *n*-области в *p*-область и дырок из *p*-области в *n*-область. В результате перераспределения зарядов вблизи контакта образуется тонкий слой нескомпенсированного пространственного заряда неподвижных положительных ионов доноров в *n*-области и отрицательных ионов акцепторов *p*-области. Этот слой носит название *p–n*-перехода. В связи с тем, что область *p–n*-перехода обеднена подвижными носителями заряда ее часто называют *обеднённой областью*.

Чаще всего используют несимметричные переходы с разной концентрацией примесей в *p*- и *n*-областях. Различная концентрация примесей создает разную плотность нескомпенсированного заряда в двухслойной структуре перехода и, как следствие этого, разную толщину слоев. В сильнолегированной области, называемой эмиттером, толщина обеднённого слоя значительно тоньше, чем в слаболегированной области, которую называют *базой*.

Между разноименными зарядами *p–n*-перехода возникают электрическое поле и потенциальный барьер (рис. 4.1, *a*), препятствующий дальнейшему дрейфу основных носителей заряда через переход. Возникает равновесное состояние, при котором процесс диффузии подвижных носителей зарядов, вызванный наличием градиента их концентраций, уравновешивается противоположным по направлению процессом дрейфа носителей заряда под действием электрического поля перехода.

При прямом включении диода (“плюс” – к зоне *p* и “минус” – к зоне *n*) поле внешнего источника противоположно полю обеднённого слоя, в результате чего ширина *p–n*-перехода сужается, пространственный заряд уменьшается, а высота потенциального барьера снижается на значение приложенного напряжения $U_{\text{пр}}$ (рис. 4.1, *б*). Как следствие нарушается равновесное состояние перехода и создаются условия для диффузии подвижных носителей заря-

да из области, где они являются основными, в область, где они становятся неосновными. Такой процесс называют *инжекцией неосновных носителей заряда*.

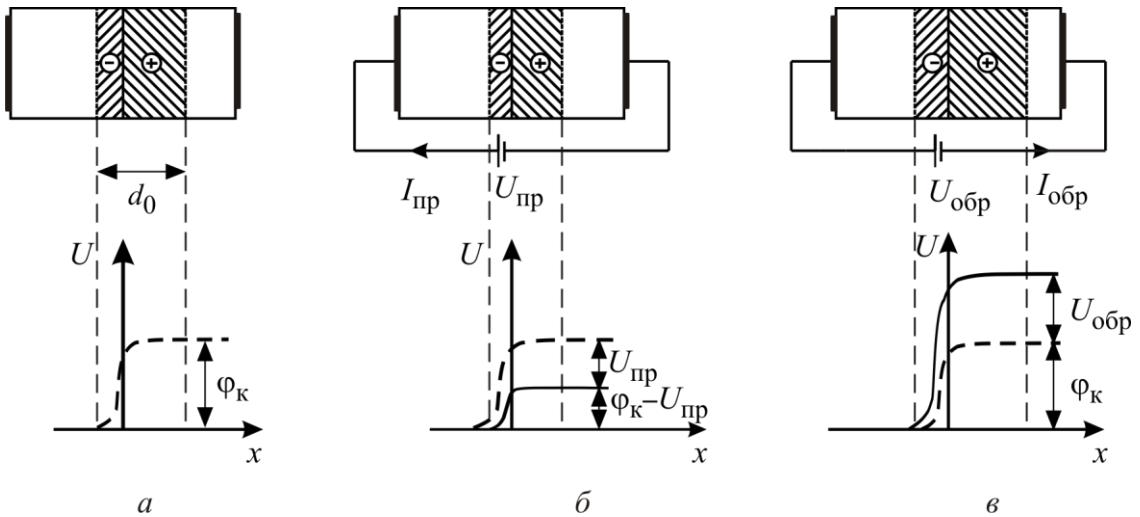


Рис. 4.1

Под действием инжекции на границах обеднённой области возникают избыточные неравновесные концентрации неосновных носителей заряда: дырок в *n*-области и электронов в *p*-области. Эти избыточные носители заряда диффундируют в глубь однородных областей, постепенно рекомбинируя с основными носителями заряда. В результате избыточные концентрации инжектируемых носителей заряда постепенно убывают и на расстоянии их диффузионной длины уменьшаются в e раз. Сила прямого тока определяется градиентом концентраций неравновесных носителей заряда на границах обеднённой области, который зависит от количества инжектируемых носителей заряда, а следовательно, от приложенного прямого напряжения.

При обратном включении диода («плюс» – к зоне *n* и «минус» – к зоне *p*) результирующее электрическое поле в *p-n*-переходе, ширина обеднённого слоя и пространственный заряд увеличиваются. В этих условиях (рис. 4.1, *в*) основные носители заряда не могут преодолеть высокий потенциальный барьер, и их диффузионный ток равен нулю. С другой стороны, сильное электрическое поле перехода не препятствует прохождению через него неосновных носителей, т. е. дырок из *n*-области и электронов из *p*-области; при этом граничные концентрации неосновных носителей уменьшаются почти до нуля. За счет образовавшегося обратного градиента неосновных носителей заряда вблизи обеднённой области происходят их диффузия к границе обеднённой области и дальнейшая экстракция через переход его электрическим полем, которое является ускоряющим для неосновных носителей. Возника-

ющий обратный ток сравнительно мал из-за малой концентрации неосновных носителей заряда.

В отличие от прямого тока обратный ток почти не зависит от приложенного обратного напряжения, так как оно не влияет на концентрацию неосновных носителей заряда и величину их градиента у перехода. Однако этот ток зависит от температуры, поскольку с ее увеличением растут концентрации неосновных носителей заряда и их градиент. В связи с такой зависимостью обратный ток называют *тепловым током*. Тепловой ток характерен для германиевых диодов. В кремниевых диодах при обратных напряжениях преобладает ток генерации, возникающий в объеме обеднённой области. Этот ток зависит от обратного напряжения, так как с его ростом увеличиваются электрические поле перехода и объем обеднённой области.

Теоретическая зависимость тока от напряжения на диоде может быть представлена уравнением

$$I = I_S \left[\exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right],$$

где I_S – тепловой ток насыщения; q – заряд электрона; k – постоянная Больцмана; T – температура.

Это уравнение получено при условии, что все напряжение источника питания приложено к электронно-дырочному переходу. В реальном приборе часть напряжения теряется на сопротивлении однородных областей и контактах. В связи с этим прямой ток диода имеет меньшее значение, чем вычисленный по формуле.

При достижении обратного напряжения некоторого критического значения наблюдается пробой перехода, приводящий к резкому увеличению обратного тока диода. Напряжение, при котором начинает происходить пробой, называется *пробивным напряжением* $U_{\text{проб}}$ (рис. 4.2, а).

В германиевых диодах чаще всего проявляется тепловой пробой, который является следствием нарушения теплового баланса диода. Увеличение обратного напряжения на диоде приводит к росту обратного тока и мощности, выделяемой в диоде. При этом повышается температура диода, увеличивается концентрация неосновных носителей заряда, что приводит к новому приращению тока. В результате возникает положительная обратная связь. Если не предусмотреть мер по ограничению тока, то диод может выйти из строя.

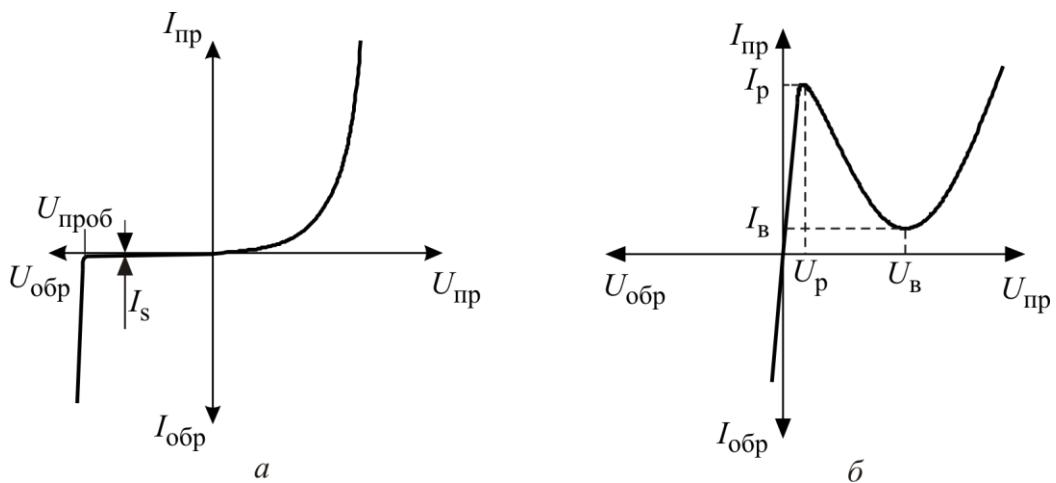


Рис. 4.2

В кремниевых диодах наблюдаются как лавинный, так и туннельный пробои. Лавинный пробой возникает в результате ударной ионизации атомов полупроводника и лавинного размножения пар носителей заряда под действием сильного электрического поля в обеднённой области. Напряжение лавинного пробоя зависит от ширины обеднённой области и определяется концентрацией примеси полупроводника: чем выше концентрация примеси, тем меньше напряжение пробоя.

При очень высокой концентрации примесей, когда ширина $p-n$ -перехода становится достаточно малой, может возникнуть туннельный пробой. В основе туннельного пробоя лежит туннельный эффект, при котором электроны, находящиеся в валентной зоне p -области, переходят в зону проводимости n -области без изменения своей энергии.

В результате туннельного эффекта при прямом включении в $p-n$ -переходе на основе вырожденных полупроводников с концентрацией примесей $10^{18} \dots 10^{20} \text{ см}^{-3}$ прямая ветвь вольт-амперной характеристики имеет N -образный участок (рис. 4.2, б). Туннельный ток при положительном напряжении создается электронами зоны проводимости n -области, которые проходят через тонкий переход в валентную зону p -области без изменения энергии, где они рекомбинируют с имеющимися там дырками. Наибольшая вероятность туннелирования возникает при небольших прямых напряжениях (0,04 … 0,15 В) и заметно снижается уже при напряжениях 0,25 … 0,5 В. При таких напряжениях обычный прямой ток инжеекции еще очень мал и основную роль играет туннельный ток, который достигает максимума в точке I_p при напряжении U_p и затем спадает. При дальнейшем увеличении прямого

напряжения с постепенным уменьшением потенциального барьера возникает ток инжекции, как в обычных переходах. При этом возникает минимальный ток I_B при некотором напряжении U_B . Характерной особенностью такой характеристики является участок между напряжениями U_p и U_B с отрицательным дифференциальным сопротивлением, позволяющим использовать его для усиления электромагнитных колебаний.

Теоретическая вольт-амперная характеристика диода с тунNELНЫМ эффектом представляется следующей зависимостью:

$$I = I_p x \exp(1 - x), \text{ где } x = U / U_p.$$

Рассмотрим некоторые типы полупроводниковых диодов.

Выпрямительные диоды широко используются в выпрямительных схемах для преобразования переменного напряжения в постоянное и характеризуются следующими параметрами: $U_{\text{пр.ср}}$ – прямое падение напряжения на диоде (среднее за период); $I_{\text{пр.ср}}$ – среднее за период значение прямого тока; $U_{\text{обр.ср}}$ – среднее за период значение обратного напряжения; $I_{\text{обр.ср}}$ – среднее за период значение обратного тока; $U_{\text{обр max}}$ – максимальное обратное напряжение; $U_{\text{пр max}}$ – максимальное значение прямого тока.

Электрические свойства выпрямительных диодов зависят от материала полупроводника, из которого они изготовлены. Наибольшее распространение получили выпрямительные плоскостные германиевые и кремниевые диоды.

Основным преимуществом германиевых диодов является малое значение прямого напряжения, которое составляет $0,2\dots0,5$ В. В кремниевых диодах это значение равно $0,7\dots1$ В. С другой стороны, кремниевые диоды выдерживают значительно большие обратные напряжения: если для германиевого диода допустимое обратное напряжение не превышает 400 В, то для кремниевого диода это напряжение может доходить до 2000 В.

Стабилитроны – это полупроводниковые диоды, используемые в схемах стабилизации напряжения. Работа стабилитрона основана на явлении электрического пробоя $p-n$ -перехода, при котором напряжение на стабилитроне остается почти неизменным в широком диапазоне изменения тока. Это напряжение принято называть напряжением стабилизации. Стабилитроны изготавливают с напряжениями стабилизации в пределах $3\dots400$ В.

Для стабилитронов характерны следующие параметры:

$U_{\text{ст}}$ – напряжение стабилизации; $r = dU / dI$ – динамическое сопротивление,

$R = U_{\text{ст}} / I$ – статическое сопротивление в точке стабилизации; I_{\min} , I_{\max} – минимальный и максимальный токи стабилизации; $\alpha_{\text{ст}}$ – температурный коэффициент напряжения стабилизации.

Качество стабилизации напряжения определяется динамическим сопротивлением стабилитрона. Чем меньше это сопротивление, тем выше качество стабилизации напряжения. Это сопротивление колеблется для различных по мощности стабилитронов от единиц ом до 100...200 Ом. Значение динамического сопротивления $r = \Delta U_{\text{ст}} / \Delta I$ можно определить экспериментально измерением приращений тока и напряжений на рабочем участке характеристики.

Статическое сопротивление стабилитрона характеризует потери в диоде в рабочей точке.

Для нормальной работы стабилитрона его ток должен превышать некоторое значение I_{\min} , при котором возникает режим устойчивого пробоя. С другой стороны, ток через диод не должен превышать значения I_{\max} ввиду опасности возникновения теплового пробоя и выхода прибора из строя.

Влияние температуры на изменение напряжения стабилизации характеризуется температурным коэффициентом напряжения стабилизации, который представляет собой относительное изменение напряжения стабилизации при изменении температуры на один градус: $\alpha_{\text{ст}} = \frac{1}{U_{\text{ст}}} \frac{\Delta U_{\text{ст}}}{\Delta T}$.

Температурный коэффициент напряжения стабилизации может иметь как положительные (при лавинном пробое), так и отрицательные (при туннельном пробое) значения. Изменение знака $\alpha_{\text{ст}}$ соответствует напряжению стабилизации $U_{\text{ст}} = 6$ В. У стабилитронов с таким напряжением стабилизации значения $\alpha_{\text{ст}}$ минимальны. При больших значениях напряжений стабилизации температурный коэффициент напряжения стабилизации может быть уменьшен с помощью изготовления специальных стабилитронов с термо компенсацией, в которых имеются два последовательно включенных диода. Дополнительный диод работает в прямом включении. С увеличением температуры напряжение на этом диоде падает и тем самым компенсирует увеличение напряжения на диоде стабилитрона. У таких стабилитронов температурный коэффициент напряжения стабилизации имеет очень малые значения, порядка 10^{-5} K^{-1} .

Вольт-амперная характеристика стабилитрона с термокомпенсацией при его прямом включении резко отличается от подобной характеристики обычного стабилитрона. Если у обычного стабилитрона прямой ток соответствует прямой ветви ВАХ $p-n$ -перехода, то в стабилитроне с термокомпенсацией при прямом включении ток очень мал, так как он ограничен обратносмещенным дополнительным диодом.

Туннельные диоды используются для усиления и генерации электромагнитных колебаний различных частот. Основными материалами для изготовления туннельных диодов являются германий и арсенид галлия. Кроме рассмотренных общих параметров диодов туннельные диоды характеризуются также и некоторыми дополнительными параметрами:

I_p / I_B – отношение токов в максимуме и в минимуме их характеристики; $\Delta U = U_B - U_p$ – перепад напряжений рабочего участка характеристики; $r_d = dU / dI$ – дифференциальное отрицательное сопротивление в средней точке рабочего участка характеристики; $I_{\text{пр max}}$ – максимально допустимый прямой ток.

Характерные значения этих параметров для туннельных диодов из германия составляют $I_p / I_B = 3\dots 10$, $\Delta U = 0,2\dots 0,3$ В, а для арсенида галлия – $I_p / I_B = 10$, $\Delta U = 0,3\dots 0,35$ В. Значение дифференциального сопротивления для этих диодов колеблется в пределах от десятых долей ома до единиц килоом.

Положительной особенностью туннельных диодов является тот факт, что туннелирование носителей заряда происходит за очень короткий промежуток времени, $10^{-13}\dots 10^{-14}$ с, поэтому туннельные диоды могут работать на частотах до сотен гигагерц.

Так как туннельный эффект проявляется без затраты тепловой энергии, туннельные диоды могут работать в очень широком диапазоне температур, от -269 до 200 °C (Ge) и до 400 °C (GaAs). Кроме того, туннельные диоды обладают стойкостью к радиации.

Помимо обычных туннельных диодов широко используются так называемые *обращенные туннельные диоды* с несколько меньшей степенью легирования полупроводника, чем у обычных туннельных диодах. В таких приборах туннельный эффект выражен слабее и на его вольт-амперной характеристике не наблюдается явно выраженный максимум.

Обращенные туннельные диоды используют в качестве детекторных и смесительных приборов, для которых требуется большая нелинейность вольт-амперной характеристики. Рабочая область обращенного туннельного диода захватывает участок с отрицательным напряжением, где наблюдается туннельный пробой, и участок с положительным напряжением, на котором проявляется слабая зависимость тока от напряжения. В этом случае рабочая точка соответствует нулевому напряжению, при котором наблюдается наибольшая нелинейность вольт-амперной характеристики.

4.2. Программа работы и методические указания по ее выполнению

Исследование выпрямительных диодов и стабилитронов разбивается на несколько частей – исследование прямых ветвей ВАХ полупроводниковых диодов и стабилитронов, исследование обратных ветвей ВАХ выпрямительных диодов, исследование обратных ветвей ВАХ стабилитронов, исследование прямых и обратных ветвей ВАХ туннельных диодов. Далее приведена последовательность действий, которые необходимо выполнить при проведении исследований:

1. Ознакомиться с основными теоретическими положениями и подготовить ответы к поставленным вопросам.
2. Выписать из справочных материалов основные параметры исследуемых диодов: германиевого и кремниевого выпрямительных диодов, стабилитронов и туннельных диодов.
3. Установив перед началом работы основные органы управления харктериографа в исходные положения, собрать схему для исследования полупроводниковых диодов, представленную на рис. 4.3:

- 3.1. Подключить к гнёздам на поле

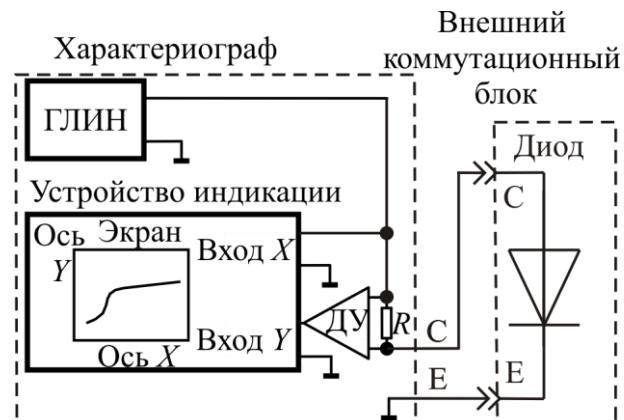


Рис. 4.3

Диод кремниевый полупроводниковый диод КД103 в соответствии с обозначением анодного и катодного выводов (анодом – к верхнему гнезду).

- 3.2. Соединить проводниками гнёзда С и Е коммутационной панели (TEST SET) с гнёздами С и Е внешнего коммутационного блока, предназначенными для подачи напряжений на полупроводниковые приборы.

4. Для исследования прямых ветвей ВАХ характеристик диодов и стабилитронов:
 - 4.1. Включить питание харктериографа кнопкой POWER.
 - 4.2. Ручкой VOLTS/DIV на поле HORIZ установить цену деления по горизонтали V_{CE} , равную 0,1В.
 - 4.3. Установить цену деления по вертикали $I_C = 1$ мА на поле VERTICAL с помощью переключателя CURRENT/DIV
 - 4.4. Ручками POSITION на полях VERTICAL и HORIZ совместить точку на экране с левым нижним углом координатной сетки на экране харктериографа.
 - 4.5. Медленно увеличивая приложенное к диоду прямое напряжение с помощью ручки VARIABLE COLLECTOR при переключателе MAX PEAK VOLTS, установленным в положение 5 В, добиться максимального прямого тока 10 мА (отклонение по вертикали – 10 делений вверх от нижней горизонтальной линии сетки на экране). Снять кривую по точкам $I = f(U)$, занося данные в таблицу. Снять не менее 10 точек. Наибольшее количество точек взять в области перегиба кривой.
 - 4.6. Предварительно устанавливая выходное напряжение харктериографа равным нулю ручкой VARIABLE COLLECTOR, повторить измерения, описанные в п. 1.7, для диода Д7Ж и стабилитрона Д814.

Следует учесть, что прямая ветвь ВАХ стабилитрона КС191С является обратной ветвью термокомпенсирующей диодной структуры. Поэтому измерения прямой ветви стабилитрона КС191С превращаются в измерения обратной ветви диода. Для этого:

- 4.7. Установить на поле Диод стабилитрон КС191С.
- 4.8. Установив ручку VARIABLE COLLECTOR в положение 0, установить переключатель MAX PEAK VOLTS в положение 100V.
- 4.9. Переключатель VOLTS/DIV на поле HORIZ установить в положение, соответствующее цене деления по горизонтали V_{CE} , равное 10 В.
- 4.10. Установить цену деления по вертикали $I_C = 0,02$ мА на поле VERTICAL.
- 4.11. Медленно увеличивая приложенное к стабилитрону прямое напряжение, добиться равенства максимального тока через него 0,02 мА (одно деление по вертикали). При раздвоении кривой на экране, которое может возникнуть из-за ёмкостных токов в харктериографе, следует воспользоваться ручками LOOPING и COMPENSATION для максимально возмож-

ного подавления этого эффекта. После этого произвести измерение прямой ветви ВАХ, как это выполнялось в предыдущих случаях.

5. Установив органы управления харктериографа в исходные положения, провести измерения обратных ветвей ВАХ диодов Д7Ж и КД103:
 - 5.1. Подключить исследуемый диод к гнёздам на поле Диод (анодом диода к анодному гнезду). Установить переключатель SERIES RESISTOR на поле VARABLE COLLECTOR в положение 100 кОм.
 - 5.2. Включить харктериограф кнопкой POWER.
 - 5.3. Установить цену деления по вертикали $I_C = 0,02$ мА с помощью переключателя CURRENT/DIV на поле VERTICAL.
 - 5.4. Установить цену деления по горизонтали равной 50 В на деление с помощью переключателя VOLTS/DIV V_{CE} на поле HORIZ.
 - 5.5. Ручками POSITION на полях VERTICAL и HORIZ совместить точку на экране с правым верхним углом основной координатной сетки.
 - 5.6. Для подачи обратного напряжения на диод инвертировать полярность выходного напряжения харктериографа, нажав кнопку INV на поле COLLECTOR SUPPLY.
 - 5.7. Увеличивая (по модулю) обратное напряжение ручкой VARIABLE COLLECTOR до начала пробоя (ток пробоя не более 0,1 мА), произвести измерения обратной ветви ВАХ по точкам, компенсируя в каждой из них при необходимости раздвоение кривой на экране с помощью ручек LOOPING и COMPENSATION.
6. Обратные ветви ВАХ стабилитронов являются рабочими участками. Для них важно достаточно точно измерить зависимость обратного тока в режиме пробоя. Поэтому на горизонтальном участке обратной ветви достаточно снять две точки. Остальные 3 точки следует расположить в области пробоя – в области перегиба и участка, где зависимость близка к вертикальной. Установив органы управления харктериографом в исходные положения, произвести следующие действия:
 - 6.1. Подключить исследуемый стабилитрон к гнёздам на поле Диод (анодом к анодному гнезду).
 - 6.2. Включить харктериограф кнопкой POWER.
 - 6.3. Установив предварительно ручкой VARIABLE COLLECTOR выходное напряжение харктериографа равным нулю, установить цену деления по горизонтали 1 В на деление с помощью переключателя VOLTS/DIV V_{CE} на поле HORIZ.

- 6.4. Цену деления по вертикали I_C установить равной 2 мА с помощью переключателя CURRENT/DIV на поле VERTICAL.
 - 6.5. Установив переключатель MAX PEAK VOLTS в положение 5 В, ручками POSITION на полях VERTICAL и HORIZ совместить точку на экране с правым верхним углом основной координатной сетки.
 - 6.6. Нажать кнопку INV на поле VARIABLE COLLECTOR.
 - 6.7. Установить переключатель MAX PEAK VOLTS в положение 20V.
 - 6.8. Увеличивая напряжение на стабилитроне ручкой VARIABLE COLLECTOR, добиться обратного тока 20 мА (десять делений по вертикали). Произвести измерения.
7. Для исследования прямых ветвей ВАХ туннельных диодов установить органы управления харктериографа в исходные положения. После чего:
 - 7.1. Установить переключатель SERIES RESISTOR в положение 5 кОм, переключатель MAX PEAK VOLTS – в положение 100 В.
 - 7.2. Ручками POSITION на полях VERTICAL и HORIZ совместить точку на экране с левым нижним углом координатной сетки на экране харкте-риографа.
 - 7.3. Ручкой VOLTS/DIV на поле HORIZ установить цену деления по гори-зонтали V_{CE} , равную 0,2 В.
 - 7.4. Подключить к гнёздам на поле Диод туннельный диод в соответствии с обозначением анодного и катодного выводов (анодом – к верхнему гнезду).
 - 7.5. Медленно увеличивая приложенное к диоду прямое напряжение с по-мощью ручки, добиться максимального прямого тока 20 мА (отклонение по вертикали – 10 делений вверх от нижней горизонтальной линии сетки на экране).
 - 7.6. Снять кривую по точкам $I = f(U)$, занося данные в таблицу. Для прямой ветви снять не менее 15 точек. Наибольшее количество точек взять в обла-сти перегибов кривой.
 8. Для снятия обратной ветви, предварительно установив ручкой VARIABLE COLLECTOR нулевое выходное напряжение (против часовой стрелки):
 - 8.1.Ручкой VOLTS/DIV на поле HORIZ установить цену деления по гори-зонтали V_{CE} , равную 0,05 В.
 - 8.2.Установить цену деления по вертикали $I_C = 2$ мА на поле VERTICAL с помошью переключателя CURRENT/DIV.
 - 8.3.Ручками POSITION на полях VERTICAL и HORIZ совместить точку на

экране с правым верхним углом координатной сетки на экране характеристографа.

8.4. Нажать кнопку INV на поле COLLECTOR SUPPLY для подачи на диод отрицательного (обратного) напряжения.

8.5. Медленно увеличивая выходное напряжение характеристографа ручкой VARIABLE COLLECTOR, добиться обратного тока диода 20 мА (отклонение от верхней горизонтальной линии на десять делений вниз).

8.6. Занести в таблицу зависимость обратного тока диода от обратного напряжения. Для обратной ветви достаточно четырёх точек.

9. Рассчитать и построить теоретические графики ВАХ германиевого выпрямительного диода и туннельного диода, используя в качестве значений I_s , I_p и U_p экспериментальные данные.

10. Рассчитать статическое сопротивление стабилитронов для средней точки рабочего участка характеристики. Вычислить по результатам измерений ΔI и ΔU динамическое сопротивление.

4.3. Содержание отчета

1. Схемы исследования диодов.
2. Таблицы измерений и графики вольт-амперных характеристик исследованных диодов.
3. Справочные данные основных параметров диодов.
4. Теоретические графики вольт-амперных характеристик германиевого выпрямительного диода и туннельного диода.
5. Вычисленные значения статического и динамического сопротивлений стабилитронов.

4.4. Контрольные вопросы

1. Какие физические процессы определяют проводимость электронно-дырочного перехода?
2. Какие существуют типы пробоя электронно-дырочного перехода, и каковы их характерные особенности?
3. Как проявляется туннельный эффект в электронно-дырочном переходе?
4. Какими свойствами и параметрами характеризуются выпрямительные диоды, стабилитроны и туннельные диоды?

5. ИССЛЕДОВАНИЕ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Цель работы: изучение свойств биполярного транзистора в режиме постоянного тока и при переменном сигнале в зависимости от схемы его включения.

5.1. Основные теоретические положения

Биполярный транзистор – это полупроводниковый прибор с двумя *p-n*-переходами, предназначенный в основном для усиления и генерации электрических сигналов. Различают два типа биполярных транзисторов: *p-n-p* и *n-p-n* (рис. 5.1). Направление стрелки у эмиттерного электрода совпадает с положительным направлением тока в эмиттерном переходе, а её остриё указывает на область с электронной проводимостью. В зависимости от полярности подаваемых напряжений на переходы транзистора различают следующие режимы его работы.

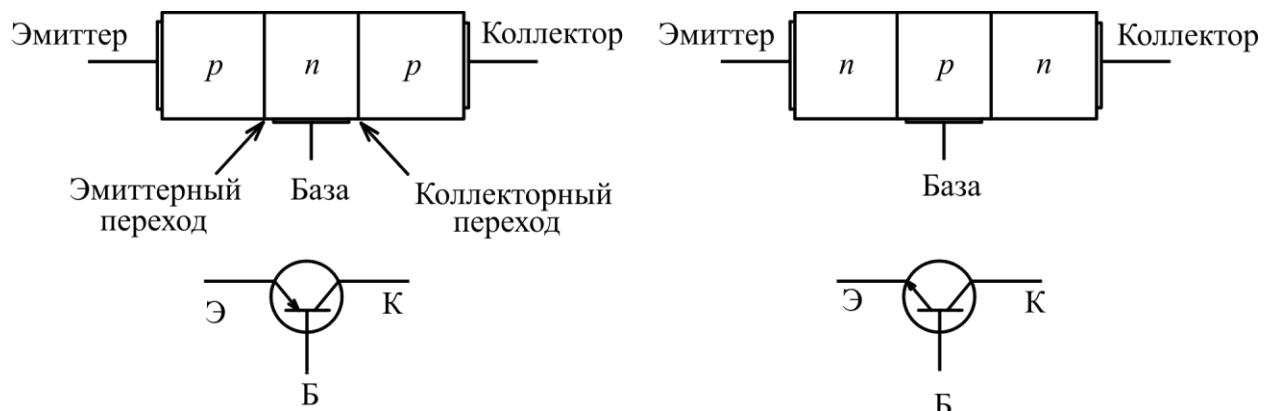


Рис. 5.1

Активный режим – эмиттерный переход смещен в прямом, а коллекторный в обратном направлении. Этот режим работы биполярного транзистора является основным.

Режим насыщения – эмиттерный и коллекторный переходы смещены в прямом направлении.

Режим отсечки токов – оба перехода смещены в обратном направлении.

Инверсный активный режим – эмиттерный переход смещен в обратном направлении, а коллекторный – в прямом.

На рис. 5.2 представлена схема включения транзистора $p-n-p$, питаемого от двух источников напряжения $U_\text{Э}$ и $U_\text{К}$. В соответствии с активным режимом коллекторный переход здесь смешен в обратном направлении, а эмиттерный – в прямом.

Работа транзистора основана на взаимодействии двух связанных между собой $p-n$ -переходов. При разорванной цепи эмиттера через коллекторный переход проходит незначительный ток, соответствующий току обратносмещенного диода.

При подаче на эмиттерный переход прямого напряжения происходит инжеекция дырок из эмиттера в базу; при этом их концентрация в базе непосредственно за эмиттерным переходом становится больше равновесной концентрации дырок в базе. С другой стороны, концентрация дырок в базе у коллекторного перехода равна нулю из-за обратносмещенного коллекторного перехода. В результате в базе транзистора возникает градиент концентрации дырок, вызывающий их диффузию к коллекторному переходу. Электрическое поле коллекторного перехода производит экстракцию дырок (неосновных носителей) из базы в коллектор, в результате чего возникает коллекторный ток, зависящий от тока эмиттера.

Во время диффузии дырок в базе к коллекторному переходу некоторая их часть успевает рекомбинировать с электронами базы; при этом возникает рекомбинационный ток базы. В результате коллекторный ток определяется разностью между эмиттерным током и током базы. Для качественной оценки распределения токов в базе вводят коэффициент передачи тока α , определяющий ту часть тока эмиттера, которая поступает в коллектор. Его значение меньше единицы ($\alpha = 0,98 \dots 0,99$). Увеличение коэффициента передачи тока достигается за счет уменьшения тока базы при уменьшении толщины базы и степени ее легирования.

Изменение напряжения на эмиттерном переходе приводит к изменению тока эмиттера, а следовательно, и тока коллектора. Другими словами, транзистор является управляемым прибором, в котором коллекторный ток зависит от тока эмиттера. Несмотря на то, что приращение коллекторного тока меньше соответствующего приращения тока эмиттера, транзистор обладает усиливательным эффектом. Действительно, при включении нагрузки в коллектор-

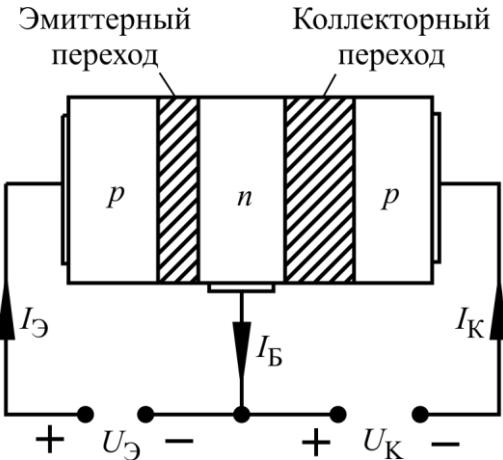


Рис. 5.2

ную цепь мощность, создаваемая переменной составляющей коллекторного тока в нагрузке, значительно больше мощности, затрачиваемой в цепи эмиттера, поскольку напряжение в цепи обратносмещенного коллекторного перехода во много раз превосходит напряжение в цепи эмиттера.

Усилительные свойства транзистора зависят от схемы его включения: от того, какой из электродов транзистора выбран общим для входной и для выходной цепей. На рис. 5.3 представлены три возможных случая включения транзистора типа $p-n-p$. На рис. 5.3, *a* приведена схема с общим эмиттером, на рис. 5.3, *б* – с общей базой; на рис. 5.3, *в* – с общим коллектором.

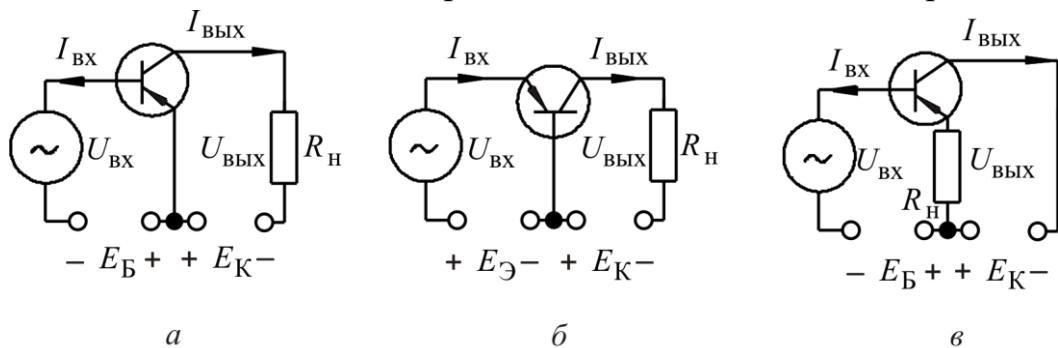


Рис. 5.3

Схема с *общим эмиттером* (ОЭ) обладает усилительными свойствами как по току, так и по напряжению. Входное сопротивление составляет единицы килоом, а выходное – единицы, десятки килоом. Эта схема осуществляет поворот фазы напряжения на 180° .

Схема с *общей базой* (ОБ) не обеспечивает усиление по току, однако она может работать на предельных частотах транзистора, что особенно важно при использовании ее в диапазоне сверхвысоких частот. Схема обладает малым входным сопротивлением (десятки – сотни ом) и большим выходным (сотни килоом).

Схема с *общим коллектором* (ОК) имеет коэффициент усиления по напряжению меньше единицы, но при этом усиливает ток и мощность. Её отличительной особенностью является малое выходное сопротивление. Этую особенность схемы часто используют для обеспечения согласования усилителя с низкоомной нагрузкой.

Статический режим работы биполярного транзистора характеризуется семействами статических характеристик, снятыми при постоянном токе в отсутствие нагрузки в выходной цепи. Семейства статических характеристик отражают взаимосвязь токов I_1, I_2 (входной и выходной) и напряжений U_1, U_2 (входного и выходного) на входе и на выходе транзисторов. Вид ха-

рактеристик зависит от схемы включения транзисторов. В работе рассматриваются семейства входных и выходных характеристик для схем с общей базой и с общим эмиттером.

Семейства входных характеристик определяют зависимость $U_1 = f(I_1)$ при $U_2 = \text{const}$. В схеме с общей базой (рис. 5.4, а) при $U_{KB} = 0$ связь между током эмиттера I_E и напряжением U_{EB} определяется вольт-амперной характеристикой эмиттерного перехода, как в обычном диоде.

Смещение входной характеристики вниз при подаче напряжения на коллектор связано с эффектом модуляции ширины базы. С ростом U_{KB} происходят уменьшение ширины базы за счет увеличения обеднённой области коллекторного перехода и как следствие этого – увеличение градиента концен-

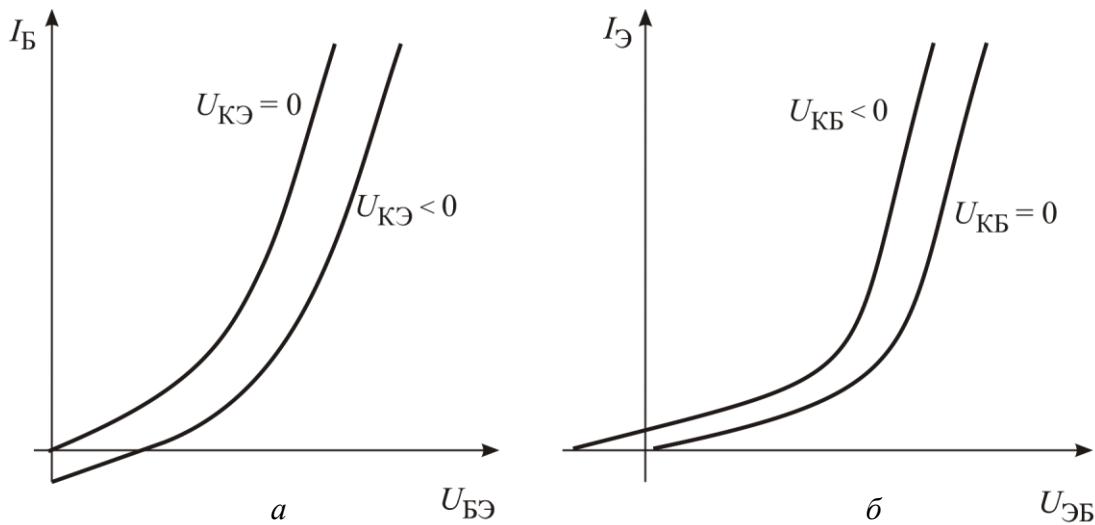


Рис. 5.4

трации неосновных носителей в базе, инжектированных со стороны эмиттерного перехода. Это приводит к увеличению тока эмиттера при включении напряжения U_{KB} .

В схеме с общим эмиттером (рис. 5.4, б) входным током является ток базы, который представляет собой сумму рекомбинационной составляющей эмиттерного тока и обратного тока коллекторного перехода. Следует иметь в виду, что часть напряжения U_{KE} прикладывается к эмиттерному переходу в прямом направлении. Это напряжение наблюдается на входной характеристике $U_{KE} < 0$ при $I_B = 0$. Входная характеристика при $U_{KE} = 0$ соответствует режиму короткого замыкания эмиттера с коллектором. В этом случае входное напряжение приложено к двум переходам и производит инжекцию неосновных носителей в базу с двух ее сторон. Распределение неосновных

носителей в базе становится одинаковым по всей ее ширине, что приводит к увеличению вероятности их рекомбинаций и к росту базового тока.

Семейства выходных характеристик определяют зависимости $I_2 = f(U_2)$ при $I_1 = \text{const}$. Для схемы с общей базой (рис. 5.5, а) это семейство может быть представлено аналитическим выражением

$$I_K = \alpha I_\Theta + I_{KB0} \left(\exp \frac{eU_{KB}}{kT} - 1 \right).$$

В отсутствие тока эмиттера коллекторный ток определяется незначительным обратным током коллекторного перехода I_{KB0} . Эмиттерный ток вызывает смещение характеристики вверх, определяя тем самым семейство выходных характеристик для разных значений I_Θ . Коллекторное напряжение почти не влияет на ток коллектора. Его уменьшение наблюдается только при изменении полярности коллекторного напряжения, когда транзистор переходит в режим насыщения.

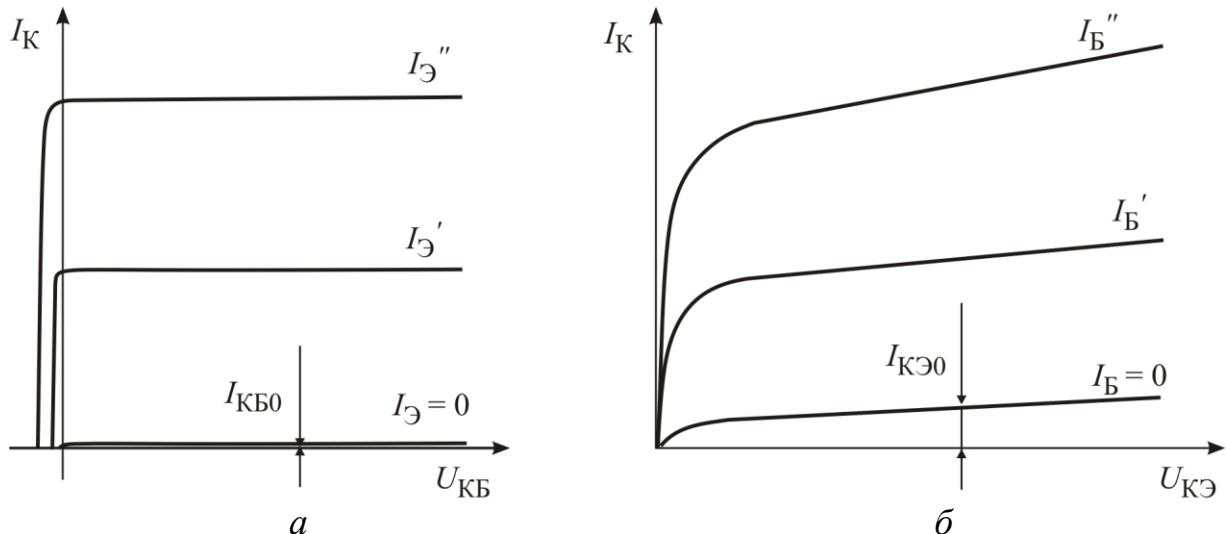


Рис. 5.5

В схеме с общим эмиттером (рис. 5.5, б) семейство выходных характеристик описывается следующим уравнением:

$$I_K = \beta I_B + I_{KE0} \left(\exp \frac{eU_{KE}}{kT} - 1 \right),$$

где β – коэффициент передачи тока базы (его значение намного больше единицы).

Обратный ток I_{KE0} в этой схеме значительно больше соответствующего тока I_{KB0} , так как часть напряжения U_{KE} приоткрывает эмиттерный переход,

вызывая дополнительную инжекцию неосновных носителей в базу. По этой же причине влияние напряжения $U_{K\bar{E}}$ на выходные характеристики заметнее, чем в схеме с общей базой.

Когда напряжение $U_{K\bar{E}}$ становится меньше напряжения $U_{B\bar{E}}$, меняется полярность на коллекторном переходе и транзистор переходит в режим насыщения.

При малых переменных сигналах токи и напряжения в транзисторе связаны линейными функциями. Комплексные амплитуды токов и напряжений связаны с h -параметрами следующими соотношениями:

$$\dot{U}_1 = h_{11}\dot{I}_1 + h_{12}\dot{U}_2;$$

$$\dot{I}_2 = h_{21}\dot{I}_1 + h_{22}\dot{U}_2.$$

Здесь $h_{11} = \dot{U}_1/\dot{I}_1$ и $h_{21} = \dot{I}_2/\dot{I}_1$ – входное сопротивление и коэффициент передачи тока при коротком замыкании выходной цепи ($\dot{U}_2 = 0$); $h_{12} = \dot{U}_1/\dot{U}_2$ и $h_{22} = \dot{I}_2/\dot{U}_2$ – коэффициент обратной связи по напряжению и выходная проводимость при холостом ходе во входной цепи ($\dot{I}_1 = 0$). При измерениях на постоянном токе комплексные амплитуды могут заменяться малыми приращениями соответствующих токов и напряжений.

Представленные параметры зависят, прежде всего, от схемы включения транзистора, а также от частоты, выбора рабочей точки и других факторов. Их можно определить экспериментальным путем из семейства статических характеристик.

Одним из основных параметров транзистора является коэффициент передачи тока h_{21} . Для схемы с общей базой $h_{21} = \alpha$, а для схемы с общим эмиттером $h_{21} = \beta$. Зависимость этого параметра от частоты определяет частотные свойства транзистора. Увеличение частоты вызывает уменьшение коэффициента передачи тока транзистора, что связано с несколькими причинами. На высоких частотах начинает сказываться влияние ёмкостей $p-n$ -переходов транзистора, емкость эмиттерного перехода C_E шунтирует сопротивление перехода и на высоких частотах эмиттерный ток начинает проходить через эту емкость, уменьшая тем самым инжекцию носителей заряда в базу транзистора. Ёмкость коллекторного перехода C_K также шунтирует высокое сопротивление коллекторного перехода и часть коллекторного тока ответвляется из нагрузки в емкость C_K .

Кроме того, на высоких частотах из-за конечного времени пролета носи-

телей через базу транзистора происходит отставание по времени коллекторного тока от тока эмиттера. Фазовый сдвиг между этими токами приводит к росту тока базы и уменьшению коэффициента передачи тока.

Предельной частотой транзистора называется такая частота, на которой модуль коэффициента передачи тока транзистора уменьшается в $\sqrt{2}$ раз. *Граничной частотой* транзистора называется такая частота, на которой модуль коэффициента усиления по току в схеме с общим эмиттером равен 1. Граничная частота транзистора в схеме с общей базой $\omega_{\text{гр.Б}}$ значительно выше граничной частоты для схемы с общим эмиттером $\omega_{\text{гр.Э}}$. Связь между ними определяется следующим выражением $\omega_{\text{гр.Э}} = (1 - \alpha)\omega_{\text{гр.Б}}$.

5.2. Программа работы и методические указания по ее выполнению

В процессе работы проводятся исследования входных и выходных характеристик для двух схем включения транзистора – с общей базой и с общим эмиттером. Для выполнения исследований необходимо:

1. Ознакомиться с основными теоретическими положениями и подготовить ответы к поставленным вопросам.
2. Выписать основные параметры исследуемого транзистора.
3. Установив основные органы управления харктериографом в **исходные положения**, собрать схему с общей базой для исследования выходных ста-

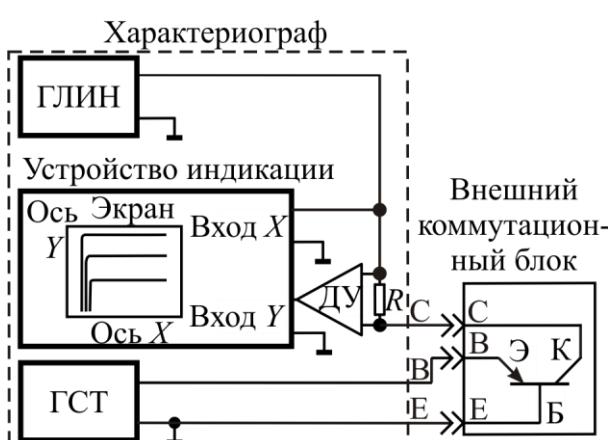


Рис. 5.6

тических характеристик транзистора (рис. 5.6). Предполагается, что исследуется *p-n-p*-транзистор. ГСТ задаёт дискретные значения эмиттерного (входного) тока. Ток эмиттера имеет ступенчатую форму и устанавливается с помощью генератора тока на поле STEP GENERATOR переключателем

STEP/OFFSET AMPL и ручками NUMBER OF STEPS и OFFSET. При этом

каждой ступени эмиттерного тока соответствует одна кривая из семейства выходных характеристик на экране. Количество кривых определяется количеством ступеней генератора тока – дискретных значений тока эмиттера. В данном измерении при установке ручки NUMBER OF STEPS на поле STEP GENERATOR в крайнее против часовой стрелки положение количество кривых равно пяти, причём первая из них должна соответствовать нулевому току эмиттера.

Для сборки измерительной схемы необходимо:

- 3.1. Соединить проводниками гнёзда С, В и Е коммутационной панели левого набора гнёзд с гнёзда С, В и Е, предназначенными для подачи напряжений на полупроводниковые приборы.
- 3.2. Установить исследуемый транзистор на внешний коммутационный блок используя гнёзда на поле Биполярный транзистор сегмента Выходные характеристики – ОБ.
4. Для измерения выходных статических характеристик в схеме с общей базой:
 - 4.1. Установить переключатель 25 на поле STEP GENERATOR в положение  (отжато) для подачи положительного напряжения (тока) на эмиттер транзистора.
 - 4.2. Установить переключатель STEP/OFFSET AMPL на поле STEP GENERATOR в положение 2 мА.
 - 4.3. Включить питание харктерографа кнопкой POWER.
 - 4.4. Ручкой VOLTS/DIV на поле HORIZ установить цену деления по горизонтали V_{CE} , равную 0,1 В.
 - 4.5. Установить цену деления по вертикали $I_C = 2$ мА на поле VERTICAL с помощью переключателя CURRENT/DIV.
 - 4.6. Нажав кнопку RIGHT на коммутационной панели TEST SET для отключения транзистора от внешнего коммутационного блока, ручками POSITION на полях VERTICAL и HORIZ совместить точку на экране с центром координатной сетки на экране харктерографа. Нажать кнопку LEFT.
 - 4.7. Установить ручку NUMBER OF STEPS на поле STEP GENERATOR в крайнее против часовой стрелки положение.
 - 4.8. Установить переключатель VOLTS/DIV на поле HORIZ в положение

 и ручкой OFFSET на поле STEP GENERATOR совместить крайнюю левую точку с центральной вертикальной линией координатной сетки на экране. При этом на выходе генератора ступенчатого напряжения (тока) формируется ступенчатый ток с токами ступеней 0, 2, 4, 6, 8 мА, определяющими ток эмиттера. Им будут соответствовать пять выходных характеристик. Вернуть переключатель VOLTS/DIV в положение 0,1 В.

4.9. Нажать переключатель DC/AC на поле COLLECTOR SUPPLY для подачи переменного напряжения на коллектор исследуемого транзистора.

4.10. Медленно увеличивая приложенное к коллектору транзистора напряжение с помощью ручки VARIABLE COLLECTOR при переключателе MAX PEAK VOLTS, установленным в положение 5 В, добиться чтобы все выходные характеристики по горизонтали достигли напряжения -0,5 В (крайняя левая вертикальная линия основной координатной сетки на экране). При этом на экране присутствуют пять выходных характеристик, верхняя из которых соответствует нулевому току эмиттера, нижняя – току эмиттера 8 мА. Снять зависимости по точкам $I = f(U)$ (коллекторного тока от напряжения «коллектор-база»), занося данные в таблицу. Для каждой кривой снять не менее 8 точек, одна из которых – для нулевого напряжения. Наибольшее количество точек взять в области положительных напряжений (правее центральной вертикальной линии).

4.11. Установив переключатель VOLTS/DIV на поле HORIZ в положение 1 В, нажав переключатель INV и отжав переключатель DC/AC на поле COLLECTOR SUPPLY, увеличить выходное напряжение ручкой VARIABLE COLLECTOR так, чтобы самая нижняя из выходных характеристик достигла коллекторного напряжения примерно -5 В. Добавить в соответствующие таблицы точки для -5, -3 и -1 В.

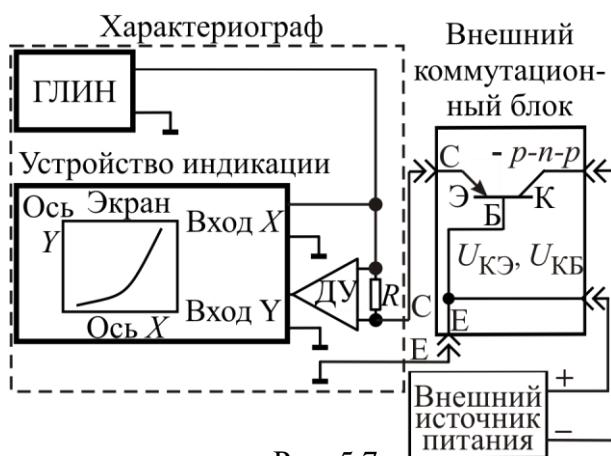


Рис. 5.7

5. Собрать схему для измерения выходных характеристик биполярного транзистора в схеме с общей базой, изображённую на рис. 5.7. Для этого, предварительно установив органы управления харкатериографа в **исходные положения**:

5.1. Соединить проводниками гнёзда С и Е коммутационной панели левого набора гнёзд с гнёздами С и Е, предназначенными для подачи напряжений на полупроводниковые приборы.

Следует обратить внимание на то, что гнёзда В в данных измерениях не используются.

- 5.2. Установить на внешний коммутационный блок исследуемый транзистор используя гнёзда на поле Биполярный транзистор сегмента Входные характеристики – ОБ.
- 5.3. Убедившись в том, что внешний источник питания отключён от сети, соединить его выход проводниками с гнёздами $U_{КЭ}$, $U_{КБ}$ коммутационного блока, обратив внимание на то, что гнездо с маркировкой – $p-n-p$, $+n-p-n$ должно быть соединено с отрицательным полюсом внешнего источника питания для подачи отрицательного напряжения на коллектор $p-n-p$ -транзистора относительно его базы.
6. Измерить входные характеристики в схеме с общей базой для двух значений напряжения «коллектор–база»: $U_{КБ} = 0$ и $U_{КБ} = -5\text{ В}$:
 - 6.1. Для снятия входных характеристик $p-n-p$ -транзисторов отжать кнопку INV на поле COLLECTOR SUPPLY для подачи положительного напряжения на эмиттер относительно базы (для $n-p-n$ -транзисторов кнопку INV нажать).
 - 6.2. Переключатель MAX PEAK VOLTS установить в положение 5 V.
 - 6.3. Выбрать предел переключателя VOLTS/DIV V_{CE} 0,2 В (при возможности – 0,01 В).
 - 6.4. Выбрать предел переключателя CURRENT/DIV $I_C = 1 \text{ mA}$.
 - 6.5. Убедившись в том, что ручка VARIABLE COLLECTOR установлена в положение 0, включить харктериограф.
 - 6.6. Совместить точку на экране с нижним левым углом координатной сетки ручками POSITION на полях VERTICAL и HORIZ.
 - 6.7. Включить внешний источник и установить его выходное напряжение равным 5 В.
 - 6.8. Ручкой VARIABLE COLLECTOR увеличивать выходное напряжение харктериографа до тех пор, пока входной ток не достигнет 10 мА (десять делений по вертикали).
 - 6.9. Снять входную характеристику для $U_{КБ} = -5$ В по точкам (восемь–девять точек, наибольшее количество точек выбрать в области максимальной кривизны зависимости).
 - 6.10. Установить напряжение внешнего источника равным нулю, для чего отключить его от коммутационного блока и соединить проводником гнёзда $U_{КЭ}$, $U_{КБ}$. Повторить измерения для $U_{КБ} = 0$ В.

7. Собрать схему для измерения выходных характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером $I_K = f(U_{K\Theta})$, изображённую на рис. 5.8. Для этого, предварительно установив органы управления характеристиографа в **исходные положения**:

7.1. Соединить проводниками гнёзда С, В и Е левого набора гнёзд коммутиционной панели характеристиографа с гнёздами С, В и Е внешнего коммутиционного блока, предназначеными для подачи напряжений на полупроводниковые приборы.

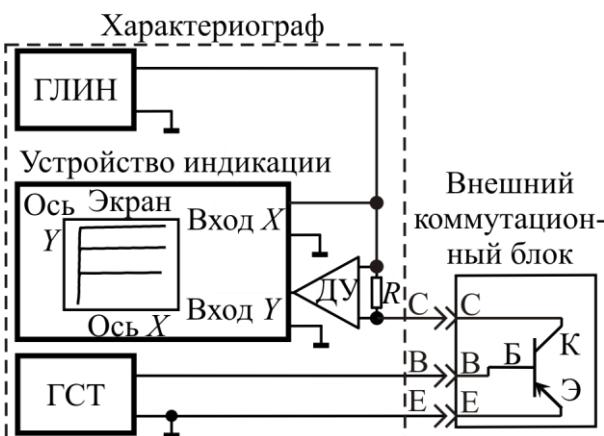


Рис. 5.8

7.2. Установить исследуемый транзистор на внешний коммутационный блок, используя гнёзда на поле Биполярный транзистор сегмента Выходные характеристики – ОЭ.

7.3. Нажать кнопку 25 на поле STEP GENERATOR для подачи отрицательного тока базы при работе с $p-n-p$ -транзистором.

7.4. Нажать кнопку INV на поле VARIABLE COLLECTOR для подачи отрицательного напряжения на коллектор при работе с $p-n-p$ -транзистором.

7.5. Переключатель STEP/OFFSET AMPL установить в положение 0,1 мА.

7.6. Включить питание характеристиографа.

7.7. Переключателем CURRENT/DIV на поле VERTICAL установить цену деления по вертикали I_C , равную 1 мА.

7.8. Переключателем VOLTS/DIV на поле HORIZ установить цену деления по горизонтали V_{CE} , равную 1 В.

7.9. Ручками POSITION на полях VERTICAL и HORIZ совместить точку с центром координатной сетки на экране характеристиографа по горизонтали и с нижней линией по вертикали.

7.10. Установить переключатель CURRENT/DIV на поле VERTICAL в положение .

7.11. При установке ручки NUMBER OF STEPS на поле STEP GENERATOR в крайнее против часовой стрелки положение на экране наблюдаются 5 точек, нижняя из которых соответствует минимальному току генератора тока (току базы). Ручкой OFFSET совместить её с нижней линией координатной сетки. На пределе 0,1 мА переключателя STEP/OFFSET токов ступеней это будет соответствовать пятиступенчатому току базы со значениями токов ступеней 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 мА.

- 7.12. Перевести переключатель CURRENT/DIV на поле VERTICAL в положение 2 мА.
- 7.13. Увеличивать выходное напряжение ручкой VARIABLE COLLECTOR до тех пор, пока самая нижняя на экране выходная характеристика, соответствующая максимальному току базы, не достигнет -5 В (по горизонтали).
- 7.14. Занести в таблицу результаты измерений точек на пяти кривых выходных характеристик. Точки на кривых следует выбирать так, чтобы более подробно снять те их участки, на которых изменения тока большие. Участки с малыми вариациями ток коллектора можно снимать менее подробно. Достаточным количеством точек можно считать 7–8 на каждую кривую.
8. Собрать схему для измерения входных характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером $I_B = f(U_{BE})$ для двух значений напряжения «коллектор–эмиттер» ($U_{KE} = 0$ и -5 В), изображённую на рис. 5.9. Для этого, предварительно установив органы управления харктериографа в **исходные положения**:
- 8.1. Соединить проводниками гнёзда С и Е коммутационной панели левого набора гнёзд харктериографа с гнёздами С и Е, предназначенными для подачи напряжений на полупроводниковые приборы. Следует обратить внимание на то, что гнёзда В не используются.
- 8.2. Установить исследуемый транзистор на внешний коммутационный блок, используя гнёзда на поле Биполярный транзистор сегмента Входные характеристики – ОЭ.
- 8.3. Убедившись в том, что внешний источник питания отключён от сети, соединить его выход проводниками с гнёздами U_{KE} , U_{KB} коммутационного блока, обратив внимание на то, что гнездо с маркировкой $-p-n-p$, $+n-p-n$ должно быть соединено с отрицательным полюсом источника питания для подачи отрицательного напряжения на коллектор $p-n-p$ -транзистора относительно его эмиттера.
9. Измерить входные характеристики в схеме с общей базой для двух значений напряжения коллектор–база $U_{KB} = 0$ и $U_{KB} = -5$ В:

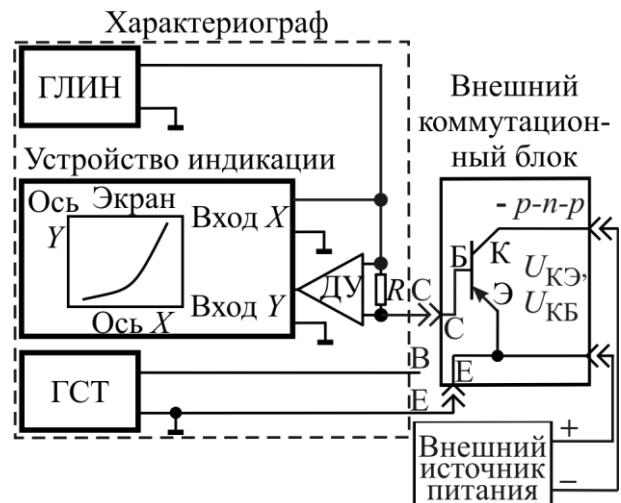


Рис. 5.9

- 9.1. Для снятия входных характеристик $p-n-p$ -транзисторов в схеме с ОЭ нажать кнопку INV на поле COLLECTOR SUPPLY для подачи отрицательного напряжения на базу относительно эмиттера (для исследования $n-p-n$ -транзисторов кнопку INV отжать).
- 9.2. Переключатель MAX PEAK VOLTS установить в положение 5 V.
- 9.3. Выбрать предел переключателя VOLTS/DIV V_{CE} 0,1 В.
- 9.4. Выбрать предел переключателя CURRENT/DIV $I_C = 1$ mA.
- 9.5. Убедившись в том, что ручка VARIABLE COLLECTOR установлена в положение 0, включить харктериограф.
- 9.6. Совместить точку на экране с правым верхним углом координатной сетки ручками POSITION на полях VERTICAL и HORIZ.
- 9.7. Включить внешний источник и установить его выходное напряжение равным 5 В.
- 9.8. Ручкой VARIABLE COLLECTOR увеличивать выходное напряжение харктериографа до тех пор, пока входной ток не достигнет 1 mA.
- 9.9. Снять входную характеристику для $U_{CE} = -5$ В по точкам (восемь-десять точек, наибольшее количество точек выбрать в области максимальной кривизны зависимости), занося результаты измерений в таблицу.
- 9.10. Установить напряжение внешнего источника равным нулю, для чего отключить его от коммутационного блока и соединить проводником гнёзда U_{CE} , U_{CB} . Повторить измерения для $U_{CE} = 0$ В. Входной ток, регулируемый ручкой VARIABLE COLLECTOR, должен достичь значения 10 mA.

5.3. Содержание отчёта

1. Схемы установок для исследования транзисторов.
2. Таблицы произведённых измерений.
3. Графики, построенные по результатам измерений.
4. Расчётные значения h -параметров.

5.4. Контрольные вопросы

1. В каких режимах может работать биполярный транзистор?
2. Какие факторы определяет усилительные свойства транзистора?

3. Какими отличительными особенностями характеризуются три схемы включения транзистора?
4. Как объяснить особенности статических характеристик в различных схемах включения транзистора?
5. Перечислите h -параметры транзистора и укажите способ их экспериментального определения.

6. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА С УПРАВЛЯЮЩИМ $p-n$ -ПЕРЕХОДОМ

Цель работы: исследование характеристик кремниевого полевого транзистора с $p-n$ -переходом и определение его физико-топологических параметров.

6.1. Основные теоретические положения

Полевые транзисторы широко используются при создании усилителей, переключателей и других устройств, как в дискретном, так и в интегральном исполнениях.

В зависимости от особенностей физических принципов действия, конструкции, полупроводникового материала полевые транзисторы делятся на многочисленные типы, одним из которых является полевой транзистор с $p-n$ -переходом в качестве затвора.

Полевой транзистор с управляемым $p-n$ -переходом (рис. 6.1) представляет собой эпитаксиальную пленку n -типа толщиной a и шириной Z , выращенную на полуизолирующем подложке. Два электрода – исток и сток, между которыми прикладывается напряжение стока $V_{СИ}$, выполняются в виде омических контактов. Третий электрод – затвор длиной L – представляет собой p^+-n -переход, формирующий в канале полевого

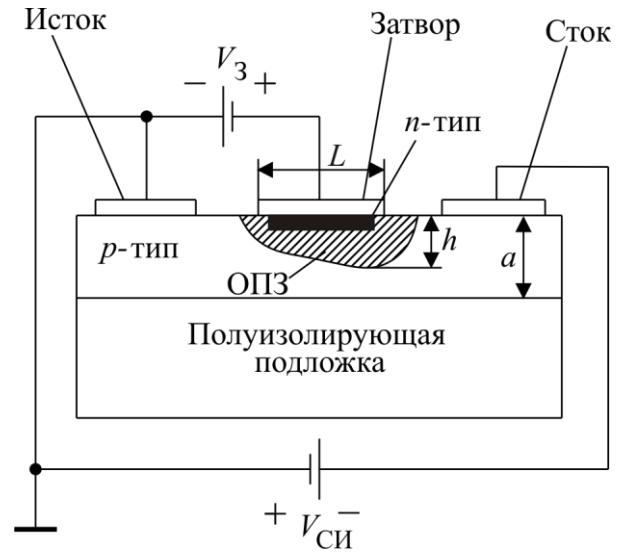


Рис. 6.1

транзистора область пространственного заряда (ОПЗ) толщиной h , обедненную подвижными носителями заряда. Таким образом, изменение напряжения на затворе V_3 приводит к изменению площади поперечного сечения канала (так как ОПЗ расширяется или сужается), а следовательно, и тока стока $I_{\text{СИ}}$, протекающего в подзатворной области.

В общем случае расчет вольт-амперных характеристик полевого транзистора представляет собой весьма сложную задачу, так как требует учета многих факторов: двумерного характера электрического поля, сложной зависимости скорости электронов от напряженности электрического поля (особенно в короткоканальных транзисторах), отсутствия резкого края проводящего канала как со стороны ОПЗ, так и со стороны подложки. Очевидно, что такой анализ возможен только в рамках численной модели.

В случае длинноканального транзистора $L \gg a$, который и исследуется в данной работе, все упомянутые явления оказываются малосущественными, что резко упрощает модель и допускает аналитическое решение. В основу этой модели, предложенной В. Шокли и названной «*моделью плавного канала*», положены следующие допущения:

1. Канал имеет плавную форму, т. е. эквипотенциали ОПЗ проходят практически параллельно границе «канал–подложка», что означает поперечный характер поля в ОПЗ и продольный – в канале.
2. ОПЗ имеет резкую границу, т. е. тепловое размытие отсутствует.
3. Подвижность электронов в канале постоянна, т. е. напряженность электрического поля невелика и насыщения скорости не происходит.

Эти допущения дают возможность построить одномерную модель, из которой следует выражение для стоковой (выходной) вольт-амперной характеристики:

$$I_{\text{СИ}} = I_0 \left\{ 3V_{\text{СИ}} / V_0 - 2 \left[(V_{\text{СИ}} + V_3 + \varphi_K)^{3/2} - (V_3 + \varphi_K)^{3/2} \right] / V_0^{3/2} \right\}, \quad (6.1)$$

где $I_0 = Z\mu e^2 N_D^2 a^3 / 6\epsilon_S L$ – ток отсечки канала (μ – подвижность носителей; e – заряд электрона; N_D – уровень легирования канала; $\epsilon_S = \epsilon_0 \epsilon$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость полупроводника); $V_0 = eN_D a^2 / 2\epsilon_S$ – напряжение отсечки канала; $\varphi_K = (kT / e) \ln(N_D N_A / n_i^2)$ – диффузионный потенциал $p^+ - n$ -перехода (контактная разность потенциалов), k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура; N_A – уровень легирования p^+ -слоя;

n_i – собственная концентрация полупроводника.

На рис. 6.2 представлены вольт-амперные характеристики, рассчитанные по формуле (1.1). Здесь выделены две области: область 1 – линейная и область 2 – насыщения. Ток $I_{\text{СИн}}$ – ток насыщения – максимальный ток при данном напряжении на затворе; $V_{\text{СИн}}$ – напряжение стока, соответствующее началу насыщения. Формула (1.1) описывает только линейную область вольт-амперной характеристики. При дальнейшем увеличении напряжения $V_{\text{СИ}}$ ток $I_{\text{СИ}}$ считается постоянным и равным $I_{\text{СИн}}$.

Причина насыщения тока заключается в перекрытии канала ОПЗ у стокового конца затвора. Толщина ОПЗ для резкого $p-n$ -перехода зависит от напряжения следующим образом:

$$h(x) = \{2\varepsilon_s [V(x) + V_3 + \varphi_K]/eN_D\}^{1/2}, \quad (6.2)$$

где $V(x)$ – текущее значение потенциала в канале.

У стокового конца затвора $V(x) = V_{\text{СИ}}$ и толщина ОПЗ максимальна. При некотором значении напряжения $V_{\text{СИ}} = V_{\text{СИн}}$ происходит отсечка (прокол) канала, т. е. $h = a$. Это значение напряжения $V_{\text{СИ}}$ связано с напряжением отсечки канала V_0 (с помощью выражения (6.2)):

$$V_{\text{СИн}} = V_0 - V_3 - \varphi_K. \quad (6.3)$$

Очевидно, что в области прокола канала, где его сечение стремится к нулю, скорость электронов, а следовательно, и напряженность электрического поля должны стремиться к бесконечности вследствие закона непрерывности полного тока: $I_{\text{СИ}}(x) = \text{const}$. Поскольку скорость электронов ограничена скоростью насыщения, то реально полной отсечки канала за счет напряжения стока $V_{\text{СИ}}$ не происходит, высота канала остается равной дебаевской длине l_D , определяющей степень размытия границы ОПЗ. Так как область прокола в длинноканальном транзисторе составляет малую долю от общей длины, то нарушение исходных предположений практически не влияет на вольт-амперные характеристики.

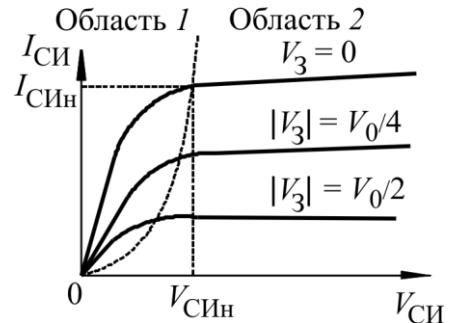


Рис. 6.2

На основе (6.1) можно получить и передаточную вольт-амперную характеристику. Для этого подставим $V_{\text{СИ}} = V_{\text{СИн}}$ и получим зависимость тока насыщения $I_{\text{СИн}}$ от напряжения затвора V_3 :

$$I_{\text{СИн}} = I_0 \left[1 - 3 \left(\frac{V_3 + \phi_K}{V_0} \right) + 2 \left(\frac{V_3 + \phi_K}{V_0} \right)^{3/2} \right]. \quad (6.4)$$

На рис. 6.3 представлена передаточная вольт-амперная характеристика полевого транзистора. Напряжение V_{31} соответствует отсечке канала, т. е.

$$V_{31} = V_0 + \phi_K. \quad (6.5)$$

На основе формулы (6.1) можно получить характеристики двух важных параметров – крутизна и проводимости канала:

$$g_m = \frac{\partial I_{\text{СИ}}}{\partial V_3} = g_{\max} \left[\left(\frac{V_{\text{СИ}} + V_3 + \phi_K}{V_0} \right)^{1/2} - \left(\frac{V_3 + \phi_K}{V_0} \right)^{1/2} \right], \quad (6.6)$$

$$g_{\text{СИ}} = \frac{\partial I_{\text{СИ}}}{\partial V_{\text{СИ}}} = g_{\max} \left[1 - \left(\frac{V_{\text{СИ}} + V_3 + \phi_K}{V_0} \right)^{1/2} \right]. \quad (6.7)$$

Здесь $g_{\max} = eN_D a \mu Z / L$.

В линейной области характеристики $V_{\text{СИ}} \ll V_3 + \phi_K$ выражение для проводимости канала имеет вид

$$g_{\text{СИ}_0} \approx g_{\max} \left[1 - \left(\frac{V_3 + \phi_K}{V_0} \right)^{1/2} \right]. \quad (6.8)$$

Такие параметры транзистора, как коэффициент усиления K и частота отсечки f_T пропорциональны крутизне g_{\max} . Ее увеличение способствует росту выходной мощности (в линейном режиме) и повышению верхней границы рабочих частот. Например, частота отсечки f_T , определяемая как

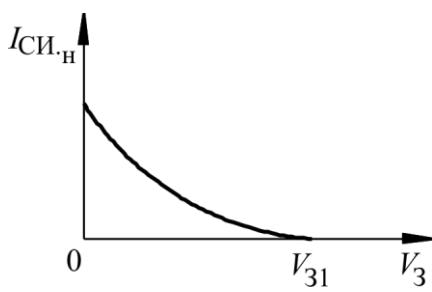


Рис. 6.3

$$f_T = \frac{g_{\max}}{2\pi C_{\text{ЗИ}}} = \frac{1}{2\pi} \approx \frac{V_{\text{СИ}} \mu}{\pi L^2}, \quad (6.9)$$

где $C_{ЗИ}$ – емкость «затвор–канал»; τ – время пролета под затвором, оказывается прямо пропорционально подвижности μ и обратно пропорциональна квадрату длины затвора L .

Уменьшение длины затвора влечет за собой увеличение крутизны и уменьшение емкости. Поэтому для получения высоких значений отсечки f_T транзистор должен быть изготовлен из полупроводника с высокой подвижностью (скоростью насыщения) и иметь короткий затвор.

Как следует из приведенных выражений для крутизны и проводимости канала, они связаны с физико-топологическими параметрами транзисторной структуры, что дает возможность их определения на основе измерения вольт-амперных характеристик.

6.2. Программа работы и методические указания по ее выполнению

Для полевого транзистора с управляемым $p-n$ -переходом производят измерение передаточных и выходных характеристик с помощью характеристиографа. Для этого следует:

1. Ознакомиться с основными положениями теории полевых транзисторов.
2. Подготовить ответы на поставленные вопросы.
3. Установив органы управления характеристиографа в исходные положения, собрать схему (рис. 6.4) для снятия статических выходных характеристик полевого транзистора с управляемым $p-n$ -переходом. В ней, в отличие от схемы для исследования биполярного транзистора, управляющего током (базы или эмиттера), используется генератор ступенчатого напряжения (ГСН), задающий фиксированные значения потенциала затвора:
 - 3.1. Соединить проводниками гнёзда С, В и Е коммутационной панели левого набора гнёзд с гнёздаами С, В и Е, предназначеными для подачи напряжений на полупроводниковые приборы.

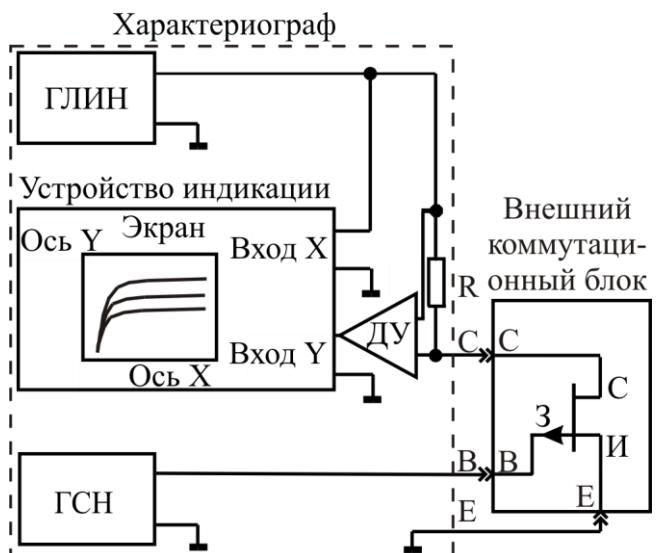


Рис. 6.4

- 3.2. Установить исследуемый полевой транзистор на внешний коммутационный блок используя гнёзда на поле Полевой транзистор.
4. Произвести измерения статических выходных вольт-амперных характеристик:
 - 4.1. Нажать кнопку INV на поле COLLECTOR SUPPLY для подачи отрицательных потенциалов на сток исследуемого полевого транзистора с каналом *p*-типа (в качестве объекта исследования предлагается полевой транзистор КП103 с каналом *p*-типа; в случае исследования *n*-канального транзистора кнопка отжата). Включить харктериограф.
 - 4.2. Ручками POSITION на полях VERTICAL и HORIZ совместить точку на экране харктериографа с правым верхним углом основной координатной сетки. При этом точка соответствует нулевым значениям стоковых токов и напряжений. Влево от неё по горизонтали располагаются отрицательные значения стокового потенциала, вниз по вертикали – отрицательные значения стокового тока.
 - 4.3. Установить цену деления по горизонтальной оси стоковых напряжений с помощью переключателя VOLTS/DIV на поле HORIZ $V_{CE} = 1$ В.
 - 4.4. Установить цену деления по вертикальной оси стоковых токов с помощью переключателя CURRENT/DIV на поле VERTICAL $I_C = 1$ мА.
 - 4.5. Напряжение на затворе при харктериографическом исследовании ПТ изменяется дискретно, пошагово, а количество дискретных значений потенциалов затвора соответствует количеству выходных характеристик. Предполагается, что выходных характеристик пять, для чего ручка NUMBER OF STEPS на поле STEP GENERATOR устанавливается в крайнее положение против часовой стрелки. При необходимости количество характеристик и, соответственно, количество затворных потенциалов, может быть изменено с помощью ручки NUMBER OF STEPS. Чтобы задать значения потенциалов затвора, при которых будут измеряться выходные характеристики, прежде всего необходимо установить шаг потенциала затвора с помощью переключателя STEP/OFFSET AMPL на поле STEP GENERATOR $V = 0,5$ В. При этом потенциал затвора для каждой из выходных характеристик отличается от потенциалов затвора для двух соседних с ней на 0,5 В. Кроме этого, необходимо задать абсолютные значения потенциалов. Для этого, отжав кнопку 25 на поле STEP GENERATOR, установить переключатель VOLTS/DIV на поле HORIZ в положение  и совместить крайнюю левую на экране точку, которая должна соответствовать нулево-

му потенциалу затвора, ручкой OFFSET на поле STEP GENERATOR с правым верхним углом основной координатной сетки. Теперь пяти выходным характеристикам соответствуют потенциалы затвора 0 (соответствует максимальному по модулю току стока), 0,5; 1; 1,5; 2 В (соответствует минимальному по модулю току стока; при необходимости можно установить шаг потенциала затвора 0,2 В). После этого следует вернуть переключатель VOLTS/DIV на поле HORIZ в положение $V_{CE} = 1$ В.

4.6. Установить переключатель MAX PEAK VOLTS на поле COLLECTOR SUPPLY в положение 20 В.

4.7. Увеличивая стоковое напряжение ручкой VARIABLE COLLECTOR, добиться, чтобы протяжённость по горизонтали нижней кривой из семейства стоковых характеристик, соответствующей нулевому затворному потенциалу, составила 5 В (от 0 В до -5 В), как это показано на рис. 6.5 для *p*-канального транзистора.

4.8. Произвести измерения семейства выходных характеристик, занося результаты измерений в таблицу зависимости стокового тока I_C от напряжения «сток-исток» U_{CS} . Наиболее подробно снять области с наибольшей кривизной характеристик. Достаточно измерить 6–8 точек на кривую.

5. Передаточные характеристики – зависимости выходного (стокового) тока от входного (затвор – исток) напряжения при фиксированных потенциалах стока – снимаются в виде семейства из двух зависимостей при напряжении на стоке, равном напряжению насыщения, и при -5 В (для *p*-канального транзистора). Поэтому сначала определяют напряжение насыщения, построив выходную характеристику для нулевого потенциала затвора. После этого проводят касательные к начальному участку кривой и к участку насыщения. Для построения касательных предпочтительно брать две первые и две последние точки кривой. Проекция точки пересечения касательных на горизонтальную ось напряжений даёт значение напряжения насыщения. Для проведения измерений передаточных характеристик необходимо:

5.1. Установить ручку VARIABLE COLLECTOR в положение 0 %.

5.2. Нажать кнопку INV на поле COLLECTOR SUPPLY для подачи отрицательных потенциалов на сток полевого транзистора с каналом *p*-типа (для *n*-канального транзистора кнопка отжата).

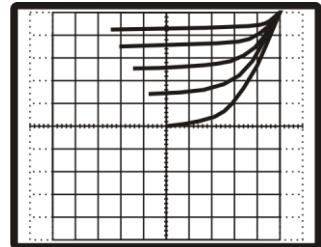


Рис. 6.5

5.3. Установить переключатель CURRENT/DIV на поле VERTICAL в положение $I_C = 1$ мА.

5.4. Установить переключатель VOLTS/DIV на поле HORIZ в положение . При этом на экране наблюдается ряд горизонтальных точек, каждая из которых соответствует фиксированному значению потенциала затвора. При нажатом переключателе INV на поле VERTICAL нулевому потенциальному соответствует крайняя правая точка (на экране не видна), при отжатом – крайняя левая. Расстояние между точками – шаг по оси напряжения «затвор – исток». Величина шага определяется положением переключателя STEP/OFFSET AMPL на поле STEP GENERATOR (сегмент V). Установить шаг равным шагу, использованному в п. 4.5, например 0,5 В.

5.5. Чтобы задать изменяющиеся пошагово значения потенциалов затвора, при которых будут измеряться передаточные характеристики, необходимо не только установить шаг потенциала с помощью переключателя STEP/OFFSET AMPL на поле STEP GENERATOR, но и задать абсолютные значения потенциалов. Для этого, установив переключатель VOLTS/DIV на поле HORIZ в положение , при отжатом переключателе INV на поле VERTICAL совместить левую крайнюю на экране точку, которая должна соответствовать нулевому потенциальному затвора, ручкой OFFSET на поле STEP GENERATOR с правым верхним углом основной координатной сетки. Теперь пяти выходным характеристикам соответствуют следующие потенциалы затвора: 0 (соответствует максимальному по модулю току стока), 0,5; 1; 1,5; 2 В. При необходимости можно увеличить число значений затворных потенциалов, вращая ручку NUMBER OF STEPS на поле STEP GENERATOR по часовой стрелке. Например, если при этом добавляется одна точка, это означает, что приведённый выше ряд потенциалов затвора дополнится напряжением 2,5 В. Теперь, зная абсолютные значения потенциалов затвора, соответствующие точкам на экране, можно перемещать их для удобства измерений с помощью ручки POSITION на поле HORIZ. При этом крайней левой точке соответствует потенциал затвора, равный нулю, крайней правой +2 В.

6. Для снятия передаточной характеристики при фиксированном потенциале затвора, например при -5 В, необходимо, предварительно установив органы управления харктерографа в исходные положения:

6.1. Установить переключатель VOLTS/DIV на поле HORIZ в положение $V_{CE} = 1$ В.

6.2. Переместить точку на экране с помощью ручек POSITION на поле HORIZ и VERTICAL в правый верхний угол координатной сетки на экране.

6.3. Увеличивать напряжение на стоке ПТ до тех пор, пока нижняя выходная характеристика, соответствующая нулевому напряжению на затворе, не достигнет по горизонтали значения -5 В (рис. 6.5).

6.4. Установить переключатель VOLTS/DIV на поле HORIZ в положение . При этом на экране представлена зависимость тока стока от стокового напряжения при дискретно изменяющемся потенциале затвора в виде вертикальных линий. Нижняя точка каждой из линий (для отрицательных токов, как в данном случае) соответствует значению тока стока для максимального напряжения, приложенного к стоку при известном потенциале затвора (рис. 6.6). Соединив эти точки, можно получить искомую передаточную характеристику. Однако, как видно из рис. 6.5, только потенциальному затвора, равному нулю, соответствует интересующее нас значение стокового потенциала -5 В (нижняя кривая на рис. 6.5). Поэтому в таблицу зависимости тока стока от напряжения «затвор – исток» можно занести значение тока для крайней левой вертикальной прямой ($V_{ЗИ} = 0$ В).

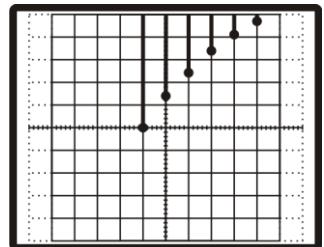


Рис. 6.6

6.5. Чтобы произвести измерения тока стока для любого другого потенциала затвора, необходимо, чтобы соответствующая ему выходная характеристика простиралась по горизонтали до -5 В. Чтобы этого добиться, нужно установить переключатель VOLTS/DIV на поле HORIZ в положение $V_{CE} = 1$ В и отрегулировать протяжённость соответствующей кривой по горизонтали до -5 В (например, второй снизу, соответствующей $V_{ЗИ} = 0,5$ В) с помощью ручки VARIABLE COLLECTOR (рис. 6.7).

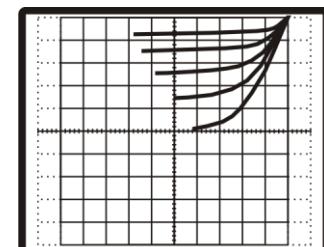


Рис. 6.7

6.6. Произвести измерение тока стока для второй слева вертикальной прямой, соответствующей $V_{ЗИ} = 0,5$ В. Повторить измерения для других потенциалов затвора, устанавливая для каждого из них протяжённость соответствующей выходной характеристики от 0 до -5 В (см. п.6.5).
6.7. Повторить измерения (пп. 6.1–6.5) при потенциале стока, равном потенциальному насыщения $V_{СИн}$, отображённом на рис. 6.2.

7. Построить графики снятых зависимостей.

8. На основе начального участка зависимости $I_{\text{СИ}} = f(V_{\text{СИ}})$ определить проводимость $g_{\text{СИ}0} = f(V_3)$. Используя измерения при двух значениях V_3 , определить диффузионный потенциал φ_K и напряжение отсечки канала V_0 . Считать $g_{\max} = 2g_{\text{СИ}0}$ ($V_3 = 0$ В).
9. Определить физико-топологические параметры кремниевого полевого транзистора (N_D , a , L , Z) на основе результатов предыдущего пункта. При этом считать: $n_i = 10^{-3}$ см $^{-3}$, $T = 300$ К, $f_T = 3 \cdot 10^6$ Гц, $\varepsilon = 11,9$, $\mu = 10^3$ см $^2/(B \cdot c)$, $N_D = 10^{19}$ см $^{-3}$.

6.3. Содержание отчета

1. Схема для исследования вольт-амперных характеристик полевого транзистора.
2. Таблицы проведенных измерений.
3. Графики стоковых и передаточных характеристик.
4. Рассчитанные по формулам (6.1)–(6.9) физико-топологические параметры транзистора (V_0 , φ_K , N_A , a , L , Z).
5. Выводы по проделанной работе.

6.4. Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действия полевого транзистора с $p-n$ -переходом в качестве затвора.
2. Назовите основные отличия полевых транзисторов от биполярных.
3. Укажите, какие допущения положены в основу модели Шокли.
4. Изобразите и поясните выходные и передаточные вольт-амперные характеристики.
5. Назовите основные дифференциальные параметры полевого транзистора и объясните их связь с физико-топологическими параметрами.
6. Какое соотношение должно выполняться между длиной затвора L и высотой канала a ?
7. Чем объясняется наклон стоковой экспериментальной вольт-амперной характеристики в области насыщения?

8. Как изменится напряжение отсечки V_0 при увеличении концентрации в канале N_A в два раза? Что при этом нужно изменить, чтобы оно осталось прежним?
9. На какие параметры транзистора влияет длина затвора L ?

7. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРОМ

Цель работы: ознакомление с устройством и назначением полевых транзисторов с изолированным затвором, экспериментальное исследование их характеристик и параметров в статическом и динамическом режимах работы.

7.1. Основные теоретические положения

Полевой транзистор с изолированным затвором – это полевой транзистор, затвор которого отделен от канала слоем диэлектрика. Благодаря этому удается значительно увеличение входного сопротивления транзистора и уменьшить мощность, потребляемую входной (затворной) цепью транзистора от источника сигнала, по сравнению с транзистором с управляющим $p-n$ -переходом. Эти преимущества рассматриваемого транзистора позволяют использовать его как элементную базу интегральных схем микроэлектронных устройств, в которых обработка сигналов происходит при малых значениях их мощности (например, в портативных устройствах с батарейным питанием, запоминающих устройствах и т. д.).

На рис. 7.1 показаны структуры полевых транзисторов с изолированным затвором: a – с индуцированным каналом, b – со встроенным каналом.

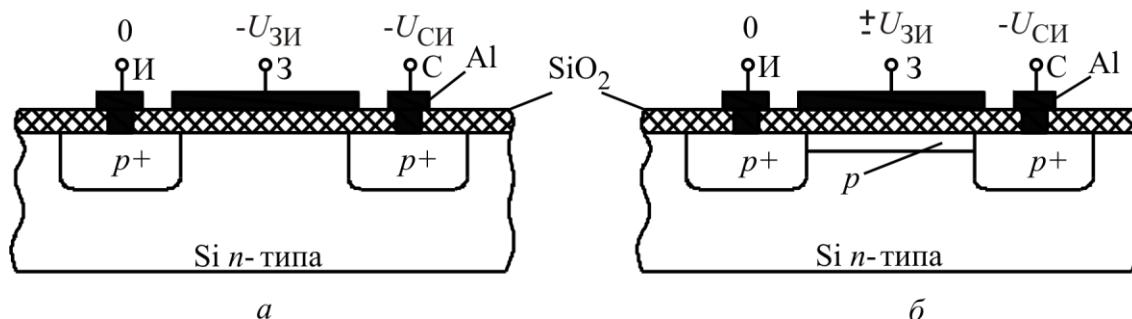


Рис. 7.1

Для создания таких структур в кристалле полупроводника с относительно высоким удельным сопротивлением, называемым подложкой, формируются две сильно легированные области с противоположным типом электропроводности. На эти области наносятся металлические электроды – исток (И) и сток (С). Расстояние между этими областями может составлять всего несколько микрометров. Поверхность кристалла между истоком и стоком покрывают тонким слоем диэлектрика ($\sim 0,1$ мкм).

В качестве диэлектрика используют слой диоксида кремния SiO_2 , выращенный на поверхности кристалла кремния путем высокотемпературного окисления в атмосфере «сухого» кислорода. На слой диэлектрика наносят металлический электрод – затвор. В результате получается структура, состоящая из металла, диэлектрика и полупроводника (МДП-транзистор).

Различают две разновидности МДП-транзисторов: с индуцированным каналом и со встроенным каналом. В МДП-транзисторах с индуцированным каналом проводящий канал между областями истока и стока появляется только при определенной полярности и при определенном значении напряжения на затворе относительно истока, которое называют пороговым напряжением $U_{ЗИ_{пор}}$. При напряжении на затворе относительно истока, равном нулю, и при наличии напряжения на стоке ток стока оказывается ничтожно малым. Он представляет собой обратный ток $p-n$ -перехода между подложкой и сильнолегированной областью стока. При отрицательном потенциале на затворе в случае p -подложки в результате проникновения электрического поля через диэлектрический слой в полупроводнике при малых напряжениях на затворе, меньших порогового $U_{ЗИ_{пор}}$, у поверхности полупроводника вследствие образования индуцированных положительных зарядов возникает обедненный основными носителями (электронами) слой и область объемного (пространственного) заряда, состоящая из ионизированных нескомпенсированных примесных атомов.

При напряжениях на затворе, больших $U_{ЗИ_{пор}}$, у поверхности полупроводника под затвором возникает инверсный слой (p -слой), который и является каналом, соединяющим исток со стоком. Характер выходных стоковых характеристик $I_C = f(U_{СИ})$, представленных на рис. 7.2, при $U_{ЗИ} = \text{const}$ для МДП-транзистора аналогичен характеру таких же зависимостей для полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом. Отклонение характеристик от линейного закона на участках от 0 до $U_{СИ_{нас}}$ объясняется уменьшением кан-

ла около стока и ростом сопротивления канала при увеличении напряжения на стоке и неизменном напряжении на затворе. Причиной этого является то, что при подаче на сток и затвор потенциалов одного знака относительно истока, и при прохождении по каналу тока стока возникает распределение напряжения по длине канала (незэквипотенциальность канала), что приводит при увеличении тока стока к уменьшению поперечного сечения канала около стока. При некотором напряжении насыщения $U_{СИ_{нас}}$ происходит перекрытие канала около стока и дальнейшее увеличение напряжения на стоке вызывает очень малое увеличение тока стока (рост напряжения компенсируется увеличением длины перекрытой части канала). Через этот перекрытый участок канала идет ток, связанный с движением дырок под действием сильного тянувшего поля. Дрейфовая скорость движения носителей насыщается и ток через канал сохраняет своё значение. Структура МДП-транзистора при $U_{СИ} > U_{СИ_{нас}}$ представлена на рис. 7.3.

При увеличении напряжения на затворе выходные характеристики смещаются в область больших токов стока. При больших напряжениях происходит лавинный пробой $p-n$ -перехода. На сток и затвор МДП-транзистора подаются напряжения одной полярности, поэтому с увеличением напряжения на затворе будет увеличиваться и $U_{проб}$ (рис. 7.2). Пробой диэлектрика под затвором может происходить при напряжении на затворе всего в несколько десятков вольт, так как толщина слоя диоксида кремния около 0,1 мкм. Сток-затворные характеристики (характеристики передачи) при разных значениях $U_{СИ}$ выходят из одной точки, соответствующей пороговому напряжению (рис. 7.4).

На рис. 7.5 представлены зависимости тока стока от напряжения на подложке.

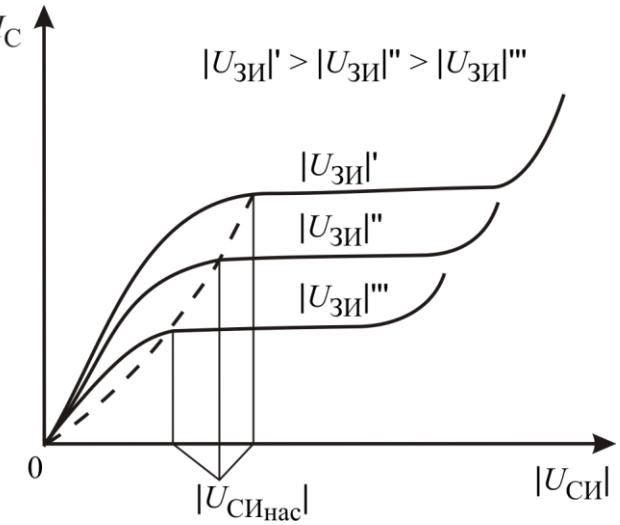


Рис. 7.2

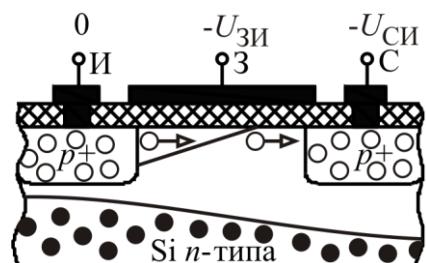


Рис. 7.3

При увеличении температуры происходит перераспределение носителей по энергиям и наблюдается смещение уровня Ферми к середине запрещенной зоны, поэтому инверсный слой под затвором образуется при меньших напряженностях электрического поля и статические характеристики при неизменном напряжении стокам разных температурах пересекаются.

В режиме насыщения для сток-затворных характеристик справедлива приближенная формула

$$I_C = \frac{\mu_{ps} C_{3K} b}{2l} (U_{ЗИ} - U_{ЗИпср})^2, \quad (7.1)$$

где μ_{ps} – подвижность дырок; C_{3K} – удельная емкость между затвором и каналом; b и l – ширина и длина канала.

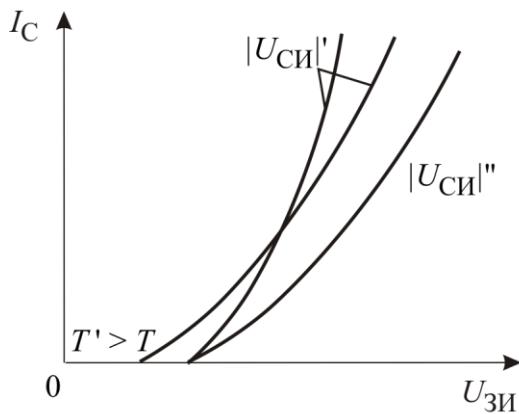


Рис. 7.4

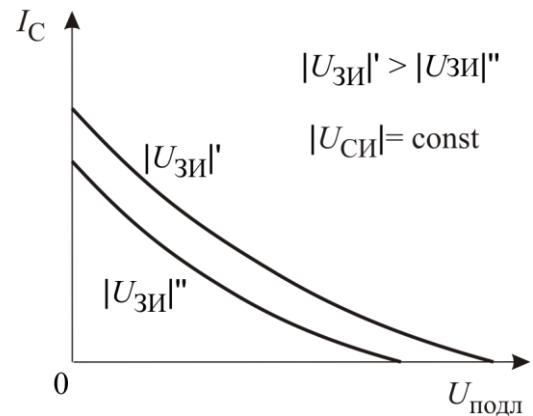


Рис. 7.5

Ток стока в первом приближении не зависит от напряжения на стоке.

Крутизна этой характеристики в зоне насыщения дрейфовой скорости определяется путем дифференцирования выражения (7.1) по напряжению на затворе:

$$S = \frac{dI_C}{dU_{ЗИ}} = \frac{\mu_{ps} C_{3K} b}{l} (U_{ЗИ} - U_{ЗИпср}). \quad (7.2)$$

Из формулы (7.2) следует, что для увеличения крутизны характеристики исходный полупроводник должен обладать большой подвижностью носителей заряда. Поэтому транзистор с n -каналом будет иметь большее значение крутизны по сравнению с p -канальным транзистором. Крутизна увеличивается с ростом ширины канала и уменьшением его длины. Использование диэлектрика с большей диэлектрической проницаемостью также приводит к увеличению крутизны. Но при увеличении емкости за счет увеличения ширины канала ухудшаются частотные свойства полевого транзистора.

В отличие от МДП-транзисторов с индуцированным каналом в полевом транзисторе со встроенным каналом поперечное сечение и проводимость канала будут изменяться при изменении напряжения на затворе как отрицательной, так и положительной полярностей. В связи с этим МДП-транзистор со встроенным каналом может работать в двух режимах: в режиме обогащения и в режиме обеднения канала носителями, как это показано на сток-затворных характеристиках транзистора со встроенным каналом (рис. 7.6). Эта особенность отражается и на стоковых (выходных) характеристиках этого транзистора (рис. 7.7).

Обозначения различных разновидностей полевых транзисторов с изолированным затвором показаны на рис. 7.8: слева направо – с индуцированным *p*-каналом, со встроенным *p*-каналом, с индуцированным *n*-каналом, со встроенным *n*-каналом соответственно.

Следует отметить, что в полевом транзисторе с изолированным затвором возможно управление током стока путем изменения напряжения как на затворе, так и на подложке.

В случае *p*-канального транзистора подача положительного напряжения на подложку приводит к увеличению области пространственного заряда (ОПЗ) и перекрытию канала. При этом ток стока постепенно падает.



Рис. 7.6

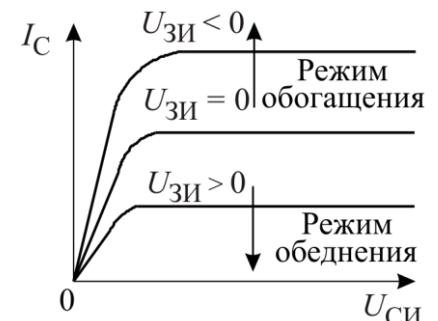


Рис. 7.7

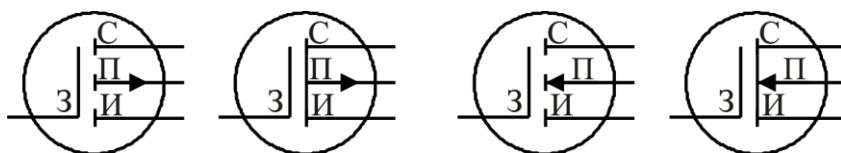


Рис. 7.8

При разных напряжениях на затворе, определяющих первоначальную толщину канала, напряжение отсечки неодинаково (см. рис. 7.4). Таким образом, можно осуществить двойное управление током стока, изменяя напряжение либо на затворе, либо на подложке. Сток-затворные характеристики при увеличении положительного напряжения на подложке сдвигаются в сторону больших значений U_{zi} , а пороговое напряжение, при котором образуется *p*-канал, увеличивается.

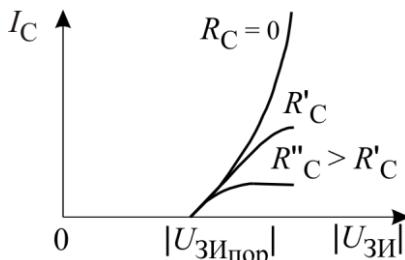


Рис. 7.9

При включении сопротивления R_C в цепь стока динамические сток-затворные характеристики идут ниже статической (рис. 7.9). Вначале при малых напряжениях на затворе транзистор оказывается в режиме насыщения. При увеличении тока стока падение напряжения на сопротивлении R_C увеличивается и, соответственно, уменьшается напряжение на стоке, так как $U_{СИ} = U_{СИ0} - I_C R_C$, и при больших токах транзистор переходит в линейный режим, а ток стока почти не изменяется с увеличением напряжения на затворе (здесь $U_{СИ0}$ – напряжение источника питания стоковой цепи).

При увеличении сопротивления R_C в цепи стока зависимости тока стока от напряжения на подложке идут ниже и начинаются из той же точки, что и статическая характеристика (рис. 7.10).

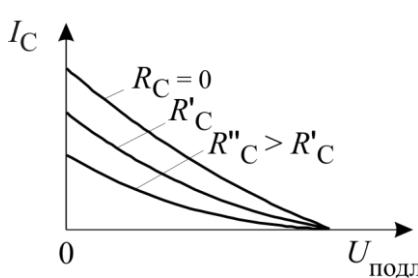


Рис. 7.10

В динамическом режиме работы полевые транзисторы с изолированным затвором и индуцированным каналом могут работать подобно другим активным приборам в режимах колебаний первого рода – без отсечки тока стока и в режиме колебаний второго рода – с отсечкой тока стока.

В случае колебаний первого рода интерес представляет малосигнальный режим класса А, когда нелинейность сток-затворной характеристики практически не искажает усиливаемый сигнал. Коэффициент усиления по напряжению в этом режиме $K = SR_C$, где S – крутизна транзистора в рабочей точке.

Режимы колебаний второго рода подразделяются на классы АВ, В и С. Для их характеристики вводят понятие угла отсечки, равного отношению половины времени протекания тока τ за период T к величине этого периода, которое выражается в радианах: $\theta = \frac{\tau}{2T} 2\pi$.

В классе АВ угол отсечки θ находится в пределах $\pi/2 < \theta < \pi$, в классе В $\theta = \pi/2$ и в классе С $\theta < \pi/2$. Напомним, что режимы колебаний второго рода используются для получения высокого коэффициента полезного действия прибора.

При работе рассматриваемого полевого транзистора в схеме преоб-

разования частоты на затвор подают напряжение одной частоты, а на подложку – напряжение другой частоты, т. е. используют режим двойного управления током стока. Например для получения амплитудно-модулированных колебаний на затвор можно подать напряжение высокой частоты ω , а на подложку – напряжение низкой частоты Ω . При этом как при управлении по затвору, так и при управлении по подложке транзистор должен работать в режиме класса А, чтобы получить линейное преобразование частоты. Выходное напряжение на нагрузке в этом случае будет определяться следующим выражением:

$$U_{\text{вых}} = U_m (1 + m \sin \Omega t) \sin \omega t,$$

где U_m – амплитуда выходного напряжения, m – глубина амплитудной модуляции, ω и Ω – соответственно, низкая и высокая круговые частоты.

7.2. Программа работы и методические указания по ее выполнению

Исследование полевых транзисторов с изолированным затвором включает в себя измерение следующих характеристик:

- выходных характеристик $I_C = f(U_{\text{СИ}})$ (стоковых) при постоянных напряжениях на затворе и напряжении на подложке, равном нулю;
- передаточных $I_C = f(U_{\text{ЗИ}})$ (сток-затворных) при постоянных напряжениях на стоке и напряжении на подложке, равном нулю;
- зависимостей тока стока от напряжения на подложке при постоянных напряжениях на затворе $U_{\text{ЗИ}} > U_{\text{ЗИ,пор}}$ и стоке $U_{\text{СИ}}$;
- зависимости $U_{\text{ЗИ,пор}}$ от напряжения на подложке.

Далее приведена последовательность действий, которые необходимо выполнить при проведении исследований:

1. Ознакомиться с основными теоретическими положениями и подготовить ответы к поставленным вопросам.
2. Выписать из справочных материалов основные параметры исследуемого транзистора.
3. Установив перед началом работы основные органы управления характеристографа в **исходные положения**, собрать схему для проведения исследований полевого транзистора с изолированным затвором, представленную на рис. 7.11. В ней, в связи с тем, что МДП-транзистор является четы-

рёхвыводным прибором, используется дополнительный источник питания.

Для сборки схемы необходимо выполнить следующие действия:

- 3.1. Соединить проводниками гнёзда С, В и Е коммутационной панели левого набора гнёзд с гнёзда С, В и Е, предназначенными для подачи напряжений на полупроводниковые приборы.
- 3.2. Установить исследуемый полевой транзистор на внешний коммутационный блок, используя гнёзда на поле Полевой транзистор.
- 3.3. Используя соединительный проводник и дополнительное гнездо на диэлектрическом кожухе макета, подключить подложку П транзистора к гнезду Подложка коммутационного блока.
- 3.4. Так как передаточные и выходные характеристики снимаются при нулевом потенциале подложки, то для его обеспечения следует при отключённом от внешнего коммутационного блока источнике питания закоротить внешним проводником гнёзда U_{ПИ}. При этом вывод подложки П по-

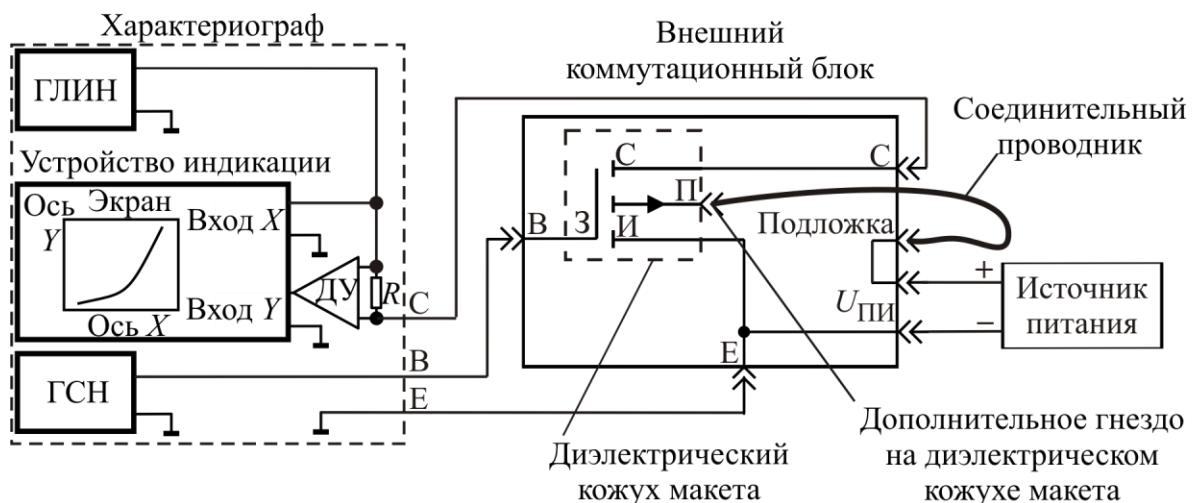


Рис. 7.11

левого транзистора соединяется с общей точкой схемы, имеющей нулевой потенциал.

4. Произвести измерения статических выходных вольт-амперных характеристик:
 - 4.1. Нажать кнопку INV на поле COLLECTOR SUPPLY для подачи отрицательных потенциалов на сток исследуемого полевого транзистора.
 - 4.2. Ручками POSITION на полях VERTICAL и HORIZONTAL совместить точку на экране характеристиографа с правым верхним углом основной координатной сетки. При этом точка соответствует нулевым значениям стоковых токов и напряжений. Влево от неё по горизонтали располагаются отрица-

тельные значения стокового потенциала, вниз по вертикали – отрицательные значения стокового тока.

4.3. Установить цену деления по горизонтальной оси стоковых напряжений с помощью переключателя VOLS/DIV на поле HORIZ $V_{CE} = 1$ В.

4.4. Установить цену деления по вертикальной оси стоковых токов с помощью переключателя CURRENT/DIV на поле VERTICAL $I_C = 1$ мА.

4.5. Напряжение на затворе при харктериографическом исследовании ПТ изменяется дискретно, пошагово, а количество дискретных значений потенциалов затвора соответствует количеству выходных характеристик. Предполагается, что наблюдаемых выходных характеристик пять, для чего ручка NUMBER OF STEPS на поле STEP GENERATOR устанавливается в крайнее положение против часовой стрелки. При необходимости количество характеристик и, соответственно, количество затворных потенциалов, могут быть изменены с помощью ручки NUMBER OF STEPS. Чтобы задать значения потенциалов затвора, при которых будут измеряться выходные характеристики, прежде всего необходимо установить шаг потенциала затвора равным 2 В. Делается это с помощью с помощью переключателя STEP/OFFSET AMPL на поле STEP GENERATOR. При этом потенциал затвора для каждой из выходных характеристик отличается от потенциалов затвора для двух соседних с ней на 2 В. Кроме этого, необходимо задать абсолютные значения потенциалов. Для этого переключатель VOLTS/DIV на поле HORIZ установить в положение и совместить крайнюю левую на экране точку, которая должна соответствовать нулевому потенциалу затвора, ручкой OFFSET на поле STEP GENERATOR с правым верхним углом основной координатной сетки. Теперь пяти выходным характеристикам соответствуют следующие потенциалы затвора: 0, 2, 4, 6, 8 В (соответствует максимальному току стока). После этого следует вернуть переключатель VOLTS/DIV на поле HORIZ в положение $V_{CE} = 1$ В.

4.6. Так как проводящий канал в p -канальном МДП-транзисторе образуется при отрицательных потенциалах затвора, необходимо инвертировать полученные в результате выполнения п. 4.5 затворные потенциалы. Для этого следует нажать кнопку 25 (см. рис. 1.5). Теперь на затвор подаётся ступенчато изменяющееся напряжение с напряжениями ступеней 0, -2, -4, -6, -8 В.

4.7. Установить переключатель MAX PEAK VOLTS на поле COLLECTOR SUPPLY в положение 20 В.

4.8. Увеличивая стоковое напряжение ручкой VARIABLE COLLECTOR добиться, чтобы протяжённость по горизонтали нижней кривой из семейства стоковых характеристик, соответствующей нулевому затворному потенциалу, составила 10 В (от 0 в до -10 В).

4.9. Произвести измерения семейства выходных характеристик, занося результаты измерений в таблицу зависимости стокового тока I_C от напряжения «сток – исток» $U_{СИ}$. Наиболее подробно снять области с наибольшей кривизной характеристик. Достаточно измерить 6–8 точек на кривую. Снимаются три зависимости – для напряжений затвора -4 , -6 и -8 В (остальные потенциалы затвора, более близкие к нулю, могут оказаться ниже порогового). При необходимости, вращая ручку OFFSET на поле STEP GENERATOR, можно добавить ещё одно значение потенциала затвора (-10 В) и, соответственно, ещё одну выходную характеристику.

5. Для проведения измерения зависимости стокового тока от напряжения на подложке $I_C = f(U_{ПИ})$ при постоянных напряжениях на затворе (рекомендованные значения -8 или -10 В) и стоке ($U_{СИ} = -5$ В) выполнить следующие действия:

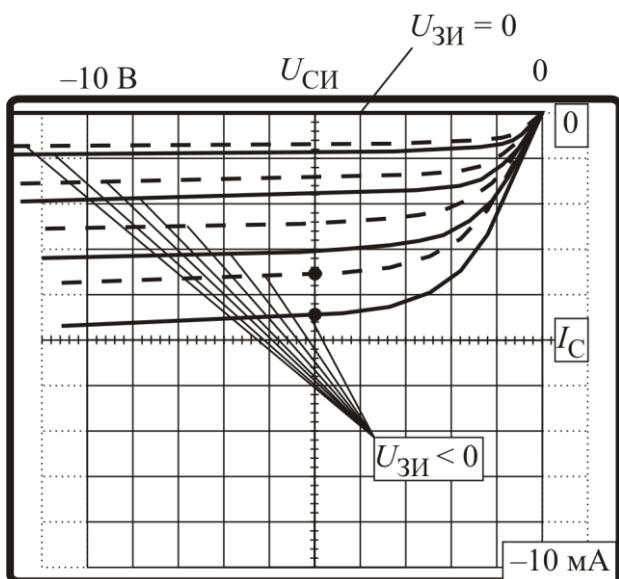


Рис. 7.12

5.1. Чтобы получить первую точку зависимости $I_C = f(U_{ПИ})$ можно воспользоваться полученным при выполнении пп. 4.1–4.8 семейством выходных характеристик на экране харakterиографа, представленным на рис. 7.12 сплошными линиями. Если взять точку на пересечении нижней выходной характеристики, соответствующей $U_{ЗИ} = -8$ В (ориентировочное значение затворного потенциала для данной кривой; в реальных измерениях может быть другим), с вертикальной прямой координатной сетки, соответствующей $U_{СИ} = -5$ В, то она будет соответствовать точке на зависимости стокового тока от напряжения на подложке при напряжении на подложке, равном нулю.

5.2. Чтобы получить остальные точки зависимости тока стока от напряжения на подложке при потенциалах подложки, отличных от нуля, необхо-

димо подключить к коммутационному блоку внешний источник напряжения. Убедившись, что он выключен, а органы регулировки его выходного напряжения установлены в положения, соответствующие минимальному выходному напряжению, подключить проводниками выход источника к гнёздам $U_{\text{ПИ}}$ на коммутационном блоке, предварительно удалив соединяющий эти гнёзда проводник. В случае p -канального транзистора «плюс» источника подключается к верхнему из двух гнезд для подачи положительного потенциала на подложку.

5.3. Включив источник, установить требуемое значение потенциала подложки, например -2 В. При этом на экране произойдёт смещение семейства выходных характеристик (пунктирные кривые). Точка на пересечении вертикальной прямой $U_{\text{СИ}} = -5$ В с пунктирной выходной характеристикой для $U_{\text{ЗИ}} = -8$ В (нижней) соответствует точке на зависимости $I_C = f(U_{\text{ПИ}})$ для $U_{\text{ПИ}} = -2$ В.

5.4. Изменяя выходное напряжение источника ($U_{\text{ПИ}}$) от -2 до -12 В с шагом 2 В, снять оставшиеся точки зависимости.

6. Передаточные характеристики – зависимости выходного (стокового) тока от входного (затвор – исток) напряжения при фиксированных потенциалах стока – снимаются при напряжении на стоке, равном -5 В и $U_{\text{ПИ}} = 0$. Для проведения измерений передаточных характеристик необходимо, предварительно установив органы управления харктериографа в исходные положения, произвести его калибровку:

6.1. Нажать кнопку INV на поле COLLECTOR SUPPLY для подачи отрицательных потенциалов на сток полевого транзистора с каналом p -типа (для n -канального транзистора кнопка отжата).

6.2. Установить переключатель CURRENT/DIV на поле VERTICAL в положение $I_C = 1$ мА.

6.3. Установить переключатель VOLTS/DIV на поле HORIZ в положение . При этом на экране наблюдается ряд горизонтальных точек, каждая из которых соответствует фиксированному значению потенциала затвора. При нажатом переключателе INV на поле VERTICAL нулевому потенциалу соответствует крайняя правая точка, при отжатом – крайняя левая. Расстояние между точками – шаг по оси напряжения «затвор – исток».

6.4. Чтобы задать изменяющиеся пошагово значения потенциалов затвора, при которых будут измеряться передаточные характеристики, прежде всего необходимо установить шаг потенциала с помощью переключателя

STEP/OFFSET AMPL на поле STEP GENERATOR 2 В. Кроме этого необходимо задать абсолютные значения потенциалов. Для этого переключатель VOLTS/DIV на поле HORIZ установить в положение  и совместить левую крайнюю на экране точку, которая должна соответствовать нулевому потенциалу затвора, ручкой OFFSET на поле STEP GENERATOR с правым верхним углом основной координатной сетки. После этого нажимают кнопку 25 (см. рис. 1.5). Теперь пяти выходным характеристикам соответствуют следующие потенциалы затвора: 0; -2; -4; -6; -8 В (соответствует максимальному по абсолютному значению току стока). При необходимости можно увеличить число значений затворных потенциалов, вращая ручку NUMBER OF STEPS на поле STEP GENERATOR по часовой стрелке. Например, если при этом добавляется одна точка, это означает, что приведённый выше ряд потенциалов затвора дополнится напряжением -10 В и в семействе выходных характеристик станет на одну кривую больше. Теперь, зная абсолютные значения потенциалов затвора, соответствующие точкам на экране, можно перемещать их для удобства измерений с помощью ручки POSITION на поле HORIZ. При этом крайней левой точке соответствует минимальный потенциал затвора (-8 В при пяти точках, -10 В при шести и т. д.), крайней правой – нулевой.

7. Для снятия передаточной характеристики при фиксированном потенциале стока -5 В необходимо отключить от коммутационного блока внешний источник питания и соединить гнёзда $U_{\text{ПИ}}$ проводником. Затем необходимо выполнить следующие действия:
 - 7.1. Установить переключатель VOLTS/DIV на поле HORIZ в положение $V_{\text{CE}} = 1$ В.
 - 7.2. Переместить точку на экране с помощью ручек POSITION на поле HORIZ и VERTICAL в правый верхний угол координатной сетки на экране.
 - 7.3. Ручкой VARIABLE COLLECTOR увеличивать напряжение на стоке, пока нижняя выходная характеристика, соответствующая минимальному напряжению на затворе (-8 В), не достигнет по горизонтали значения -5 В.
 - 7.4. Установить переключатель VOLTS/DIV на поле HORIZ в положение . При этом на экране представлена зависимость тока стока от стокового напряжения при дискретно изменяющемся потенциале затвора в виде вертикальных линий. Нижняя точка каждой из линий (для отрицательных токов, как в данном случае) соответствует значению тока стока для макси-

мального напряжения, приложенного к стоку при известном потенциале затвора. Соединив эти точки, можно получить искомую передаточную характеристику. Однако только потенциальному затвору -8 В соответствует интересующее нас значение стокового потенциала -5 В. Поэтому в таблицу зависимости тока стока от напряжения «затвор – исток» можно занести значение тока для крайней левой вертикальной прямой $U_{ЗИ} = -8$ В.

7.5. Чтобы произвести измерения тока стока для любого другого потенциала затвора необходимо, чтобы соответствующая ему выходная характеристика простиралась по горизонтали до -5 В. Чтобы этого добиться, нужно установить переключатель VOLTS/DIV на поле HORIZ в положение $V_{CE} = 1$ В. Затем отрегулировать протяжённость соответствующей кривой по горизонтали до -5 В (например, второй снизу, соответствующей $U_{ЗИ} = -6$ В) с помощью ручки VARIABLE COLLECTOR и вновь вернуть переключатель VOLTS/DIV на поле HORIZ в положение .

7.6. Произвести измерение тока стока для второй слева вертикальной прямой, соответствующей $U_{ЗИ} = -6$ В, и так для всех значений потенциала затвора (и соответствующих им вертикальных прямых), устанавливая для каждого из них протяжённость соответствующей выходной характеристики от 0 до -5 В, как это описано в п. 7.5.

8. Для измерения зависимости порогового напряжения от напряжения на подложке $U_{пор} = f(U_{ПИ})$ при потенциале стока $U_{СИ} = -5$ В можно воспользоваться полученной в п. 7 на экране передаточной характеристикой:

8.1. Так как пороговому напряжению соответствует момент образования проводящего канала между стоком и истоком и, соответственно, минимальный, стремящийся к нулю стоковый ток, то для проведения измерений достаточно установить горизонтальную протяжённость выходной характеристики при $U_{ЗИ} = 0$ В (верхней на рис. 7.12) до $U_{СИ} = -5$ В. Это можно сделать с помощью ручки VARIABLE COLLECTOR на поле COLLECTOR SUPPLY, предварительно установив переключатель VOLTS/DIV на поле HORIZ в положение $V_{CE} = 1$ В.

8.2. Вновь вернуть переключатель VOLTS/DIV на поле HORIZ в положение  и, экстраполировав кривую (пунктирная линия, изображённая на рис. 7.13), соединяющую вершины вертикальных линий, найти точку её пересечения с линией, соответствующей нулевому току стока – верхней горизонтальной прямой основной координатной сетки на экране. Зная

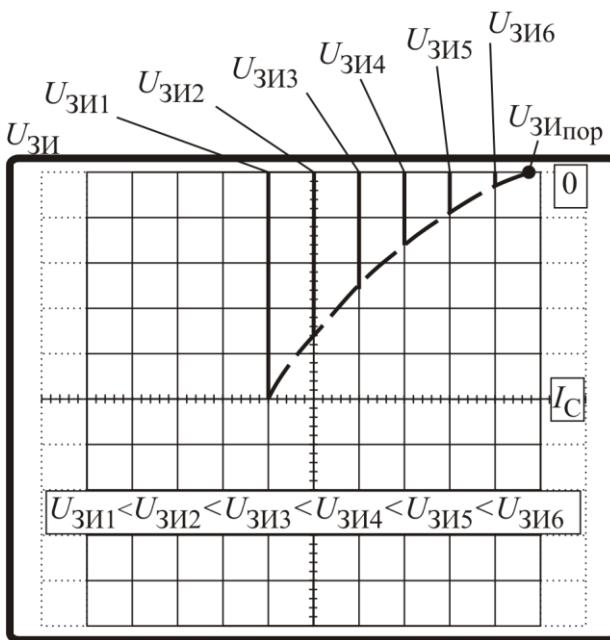


Рис. 7.13

установленные в пп. 6.1–6.4 потенциалы затвора $U_{3И1}, U_{3И2}, U_{3И3}, U_{3И4}, U_{3И5}, U_{3И6}$, можно определить значение порогового напряжения $U_{3Ипор}$.

8.3. Определённое в п. 8.2 пороговое напряжение соответствует нулевому потенциалу подложки. Чтобы определить его при других потенциалах, необходимо подключить к выносному коммутационному блоку источник питания (рис. 7.11). Убедившись, что он выключен, а органы регулировки его выходного напряжения установлены в положения, соответствующие

минимальному выходному напряжению, подключить проводниками выход источника к гнёздам $U_{ПИ}$ на коммутационном блоке, предварительно удалив соединяющий эти гнёзда проводник. В случае p -канального транзистора «плюс» источника подключается к верхнему из двух гнезд для подачи положительного потенциала на подложку.

8.4. Включив источник, установить требуемое значение потенциала подложки, например –2 В. Определить пороговое напряжение, как это было сделано в п. 8.2.

8.5. Изменяя выходное напряжение источника ($U_{ПИ}$) от –2 до –12 В с шагом 2 В, снять оставшиеся точки зависимости.

7.3. Содержание отчета

1. Основные справочные данные исследуемого транзистора.
2. Схемы измерений в статическом и динамическом режимах с необходимыми пояснениями.
3. Результаты измерений выходных и передаточных характеристик в виде таблиц и соответствующих графиков.
4. Расчетные значения крутизны по затвору $S_3 = dI_C / dU_{3И}$ и по подложке $S_{П} = dI_C / dU_{П}$ и внутреннего сопротивления $R_i = dU_{СИ} / dI_C$. Сопротивление определяется для участков насыщения выходных характеристик.

5. Выводы по работе.

7.4. Контрольные вопросы

1. Объясните принцип работы полевых транзисторов с изолированным затвором и их назначение.
2. Перечислите разновидности полевых транзисторов с изолированным затвором.
3. Какие физические процессы влияют на характер зависимости тока стока от напряжения на стоке полевого транзистора с индуцированным каналом?
4. Объясните принцип двойного управления током стока в полевом транзисторе.
5. Объясните режимы работы исследуемого транзистора при усилении переменного сигнала.
6. Объясните динамические сток-затворные характеристики.
7. Укажите пути повышения крутизны полевого транзистора с изолированным затвором.

8. ИССЛЕДОВАНИЕ ТИРИСТОРА

Цель работы: исследование физических процессов, определяющих основные характеристики тиристора; ознакомление с методами измерения основных параметров, со способами включения и выключения тиристора.

8.1. Основные теоретические положения

Тиристоры – полупроводниковые приборы на основе многослойной $p-n-p-n$ -структурь, которые обладают бистабильными характеристиками и способны переключаться из одного состояния в другое.

Схематическое изображение структуры тиристора [4] и типичное распределение примеси вдоль оси тиристора приведены на рис. 8.1, *a*, *б* соответственно.

Здесь p_1 , n_2 – области эмиттеров, n_1 , p_2 – области баз тиристора и, соответственно, переходы p_1-n_1 - и n_2-p_2 – эмиттерные переходы, а n_1-p_2 – коллекторный переход. В такой структуре ток будет определяться наибольшим

сопротивлением обратносмещенного коллекторного перехода, а начальный участок ВАХ будет подобен ВАХ обратносмещенного $p-n$ -перехода.

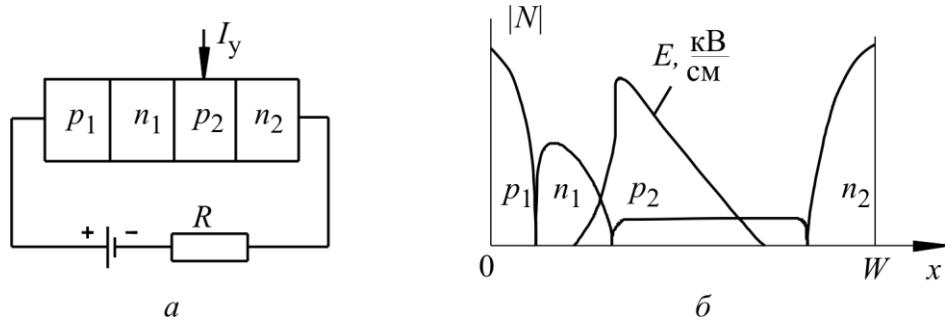


Рис. 8.1

С ростом тока при некоторых значениях $I_{\text{вкл}}$ и $U_{\text{вкл}}$ произойдет включение тиристора (рис. 8.2, а). Из рис. 8.1, б следует, что уровни легирования p_1 -эмиттера и n_2 -эмиттера на несколько порядков выше, чем уровень легирования n_1 -базы и p_2 -базы. Поэтому во включенном состоянии, когда эмиттеры инжектируют в базы носители заряда, сопротивление коллекторного перехода становится малым (доли ома), структура будет подобна диоду p_1-n_2 , а уча-

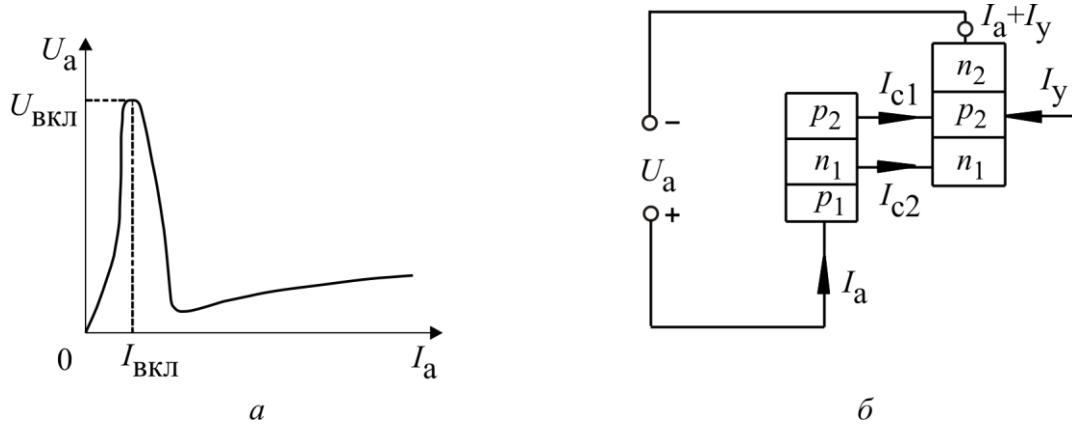


Рис. 8.2

сток ВАХ, соответствующий включенному состоянию, подобен ВАХ прямой ветви $p-n$ -перехода (рис. 8.2, а).

Процесс включения тиристора определяет переходный участок ВАХ от точки, соответствующей $U_{\text{вкл}}$, до включенного участка. Рассмотрим процесс включения тиристора на модели двух транзисторов (рис. 8.3, б). Из рисунка следует: $I_A = I_{C1} + I_{C2}$.

Кроме того, для $p_1-n_1-p_2$ -транзистора $I_{C1} = \alpha_1 I_A + I_{C10}$ и для $n_2-p_2-n_1$ -транзистора $I_{C2} = \alpha_2(I_A + I_y) + I_{C20}$. Здесь α_1 и α_2 – коэффициенты передачи транзисторов в схеме с общей базой. Обозначив $I_{C0} = I_{C10} + I_{C20} -$

полный ток обратносмещенного коллекторного p_2-n_1 -перехода, получим $I_A = (\alpha_2 I_y + I_{C0})/[1 - (\alpha_1 + \alpha_2)]$.

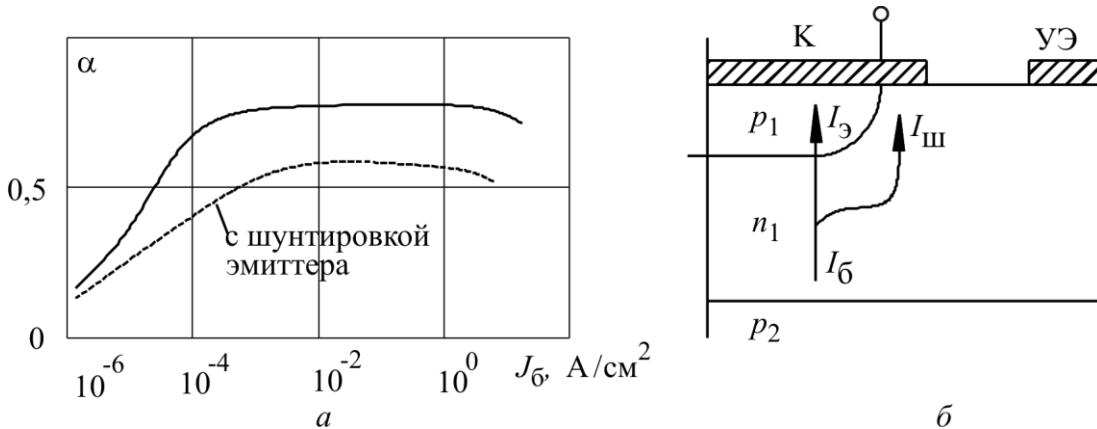


Рис. 8.3

Это выражение совместно с рис. 8.3, а объясняет процесс включения тиристора. Включение тиристора начинается при достижении уровня плотности тока, при котором выполняется условие $\alpha_1 + \alpha_2 > 1$. При этом приращение тока базы n_1 возрастает в $\beta_2 = \alpha_2 / (1 - \alpha_2)$ раз, где β_2 – коэффициент усиления по току транзистора $n_2-p_2-n_1$, включенного по схеме с общим эмиттером. Этот ток, в свою очередь, является током базы p_2 второго транзистора, который усилится этим транзистором в $\beta_1 = \alpha_1 / (1 - \alpha_1)$ раз. Такой регенеративный процесс продолжается до тех пор, пока не перестанет выполняться условие $\alpha_1 + \alpha_2 > 1$ из-за высокой плотности тока эмиттера (рис. 8.3, а).

Таким образом, для включения тиристора необходимо обеспечить протекание тока, при котором выполняется условие $\alpha_1 + \alpha_2 > 1$. Это определяет возможные способы включения:

1. включение током управления, когда вводится ток через дополнительный электрод одной из баз тиристора (см. рис. 8.1, а, и рис. 8.3);
2. увеличение тока за счет лавинного умножения в коллекторном переходе;
3. увеличение тока за счет инжекции носителей при облучении базы тиристора светом (фототиристор) или пучком ускоренных электронов;
4. увеличение тока с ростом U_A за счет достижения областью пространственного заряда коллекторного перехода эмиттерного перехода (прокол базы, см. рис. 8.1, б);

5. увеличение тока при быстром увеличении U_A так, что $I_{\text{вкл}} \approx C \frac{dU}{dt}$

где C – емкость коллекторного перехода;

6. увеличение тока при увеличении температуры тиристора.

Для обеспечения заданных значений $I_{\text{вкл}}$ и $U_{\text{вкл}}$ используют метод управления величиной α – шунтирование эмиттерного перехода (рис. 8.3, б). При этом часть катодного контакта контактирует непосредственно с базой и часть тока базы выводится на контакт, минуя эмиттер. Как видно из рис. 8.3, а при шунтировании требуется достичь больших токов базы для

обеспечения условия включения $\alpha_1 + \alpha_2 > 1$.

При работе тиристора по схеме на рис. 8.1, а следует учитывать влияние R – нагрузочной характеристики (рис. 8.4). В этом случае при включении тиристора рабочая точка будет перемещаться от точки включения A до точки B по нагрузочной прямой. Дальнейшее увеличение напряжения

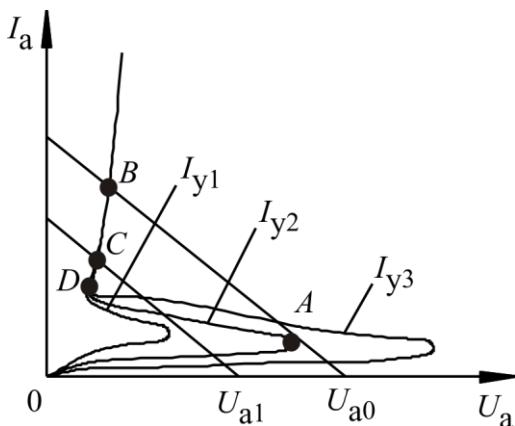


Рис. 8.4

соответствует перемещению рабочей точки от B вверх по ВАХ тиристора. Уменьшение U_A приводит к ее перемещению в точку C и далее к точке D , соответствующей току удержания $I_{\text{уд}}$.

Процесс выключения тиристора. Для выключения тиристора необходимо выполнить два условия: обеспечить $\alpha_1 + \alpha_2 < 1$, и вывести избыточные носители из баз тиристора. Этого можно добиться следующими способами:

7. прерыванием тока тиристора, приводящего к рассасыванию носителей заряда из-за рекомбинации;
8. приложением анодного напряжения обратной полярности в течение некоторого времени, приводящего к рассасыванию избыточного заряда за счет рекомбинации и дрейфа в электрическом поле, что уменьшает время выключения;
9. отводом через управляющий электрод к базе тиристора такой части тока, которая обеспечивает выполнение условия $\alpha_1 + \alpha_2 < 1$ изменением полярности источника.

Основные параметры тиристоров. Система параметров состоит из параметров прибора и предельно допустимых параметров режима его эксплуатации. Основными параметрами являются $U_{\text{пер}}$ – напряжение переключения (прямое напряжение, при котором происходит переключение тиристора); $U_{\text{обр}}$ – максимальное обратное напряжение (соответствует началу области загиба обратной ветви ВАХ); U_{oc} – прямое падение напряжения (напряжение на тиристоре в открытом состоянии после включения); U_0 – пороговое напряжение (определяется линейной экстраполяцией ветви ВАХ в открытом состоянии до пересечения с осью напряжений); R_d – динамическое сопротивление (котангенс угла, определяемого по наклону прямой ветви ВАХ к оси напряжений); $I_{\text{ут}}$ – ток утечки (на прямой блокирующей ветви); $I_{\text{уд}}$ – ток удержания (наименьший ток в открытом состоянии, поддерживающий тиристор в открытом состоянии); I_{y0} – отпирающий ток управления (наименьший ток управления, обеспечивающий включение); U_{y0} – отпирающее напряжение управления (наименьшее напряжение управления, необходимое для протекания I_{y0}); $t_{\text{вкл}}$ – время включения; $t_{\text{выкл}}$ – время выключения (время от момента, когда прямой ток в открытом состоянии достиг нуля, до момента, когда к тиристору опять приложено все прямое анодное напряжение).

8.2. Программа работы и методические указания по ее выполнению

1. Ознакомиться с общими теоретическими положениями, описывающими работу тиристора.
2. Подготовить ответы на контрольные вопросы.
3. Используя заданные предельные параметры тиристора, рассчитать требуемое сопротивление нагрузки $R \geq (3...5)U_{\text{пер}} / I_{\text{уд}}$.
4. Собрать схему измерения ВАХ тиристора в соответствии с рис. 8.5. Для этого, предварительно устано-

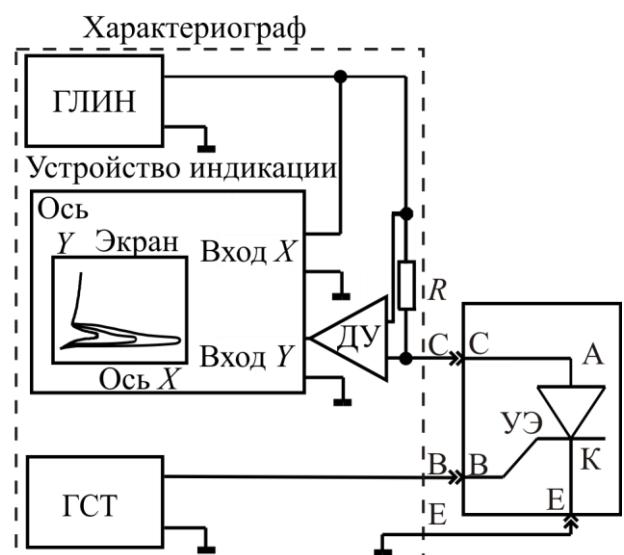


Рис. 8.5

вив органы управления харктериографа в исходные положения:

4.1. Подключить объект исследования к гнёздам на поле Тиристор внешнего коммутационного блока.

4.2. Соединить проводниками гнёзда С, В и Е коммутационной панели (TEST SET) с гнёздами С, В и Е выносного коммутационного блока, пред назначенными для подачи напряжений на полупроводниковые приборы.

5. Произвести измерение ВАХ тиристора, для чего:

5.1. Убедиться, что переключатель 25 отжат. Включив харктериограф, ручками POSITION на полях VERTICAL и HORIZ совместить точку на экране с левым нижним углом основной координатной сетки.

5.2. Установить цену деления по горизонтальной оси напряжений с помощью переключателя VOLTS/DIV на поле HORIZ $V_{CE} = 10$ В.

5.3. Установить цену деления по вертикальной оси токов с помощью переключателя CURRENT/DIV на поле VERTICAL $I_C = 1$ мА.

5.4. Предполагается, что исследуется пять вольт-амперных характеристик, для чего ручка NUMBER OF STEPS на поле STEP GENERATOR устанавливается в крайнее положение против часовой стрелки. Чтобы задать значения токов управляющего электрода, при которых будут измеряться ВАХ, необходимо установить шаг тока управляющего электрода с помощью переключателя STEP/OFFSET AMPL на поле STEP GENERATOR 0,1 мА. При этом ток управляющего электрода для каждой из выходных характеристик отличается от тока управляющего электрода для двух соседних с ней на 0,1 мА. Кроме этого, необходимо задать абсолютные значения токов. Для этого переключатель CURRENT/DIV на поле VERTICAL установить в положение  и совместить нижнюю точку на экране, которая должна соответствовать нулевому току управляющего электрода, ручкой OFFSET на поле STEP GENERATOR с левым нижним углом основной координатной сетки. Теперь пяти выходным характеристикам соответствуют следующие ток управляющего электрода: 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 мА (при необходимости может быть установлен шаг управляющего тока 0,2 мА). После этого следует вернуть переключатель CURRENT/DIV на поле VERTICAL в положение 1 мА.

5.5. Переключатель SERIES RESISTORS на поле COLLECTOR SUPPLY установить в положение, соответствующее расчётному значению сопротивления, окружённому до ближайшего большего значения сопротивления из ряда значений, имеющихся на шкале переключателя.

5.6. Медленно увеличивая приложенное к тиристору напряжение с помощью ручки VARIABLE COLLECTOR на поле COLLECTOR SUPPLY при переключателе MAX PEAK VOLTS, установленном в положение 100 В, добиться наблюдения на экране всех пяти ветвей ВАХ, как на рис. 8.4, на котором представлены три ветви ВАХ. При необходимости можно установить переключатель MAX PEAK VOLTS в положение 500 В, предварительно уменьшив выходное напряжение харктериографа до нуля ручкой VARIABLE COLLECTOR (против часовой стрелки до упора).

5.7. Произвести измерения ВАХ, занося значения токов и напряжений точек на них в таблицу – 10–12 точек на одну ветвь ВАХ. При необходимости можно изменять масштабы изображения по вертикали и по горизонтали переключателями CURRENT/DIV на поле VERTICAL и VOLTS/DIV на поле HORIZ.

По снятым зависимостям определить параметры тиристора U_0 , R_d , I_{yt} , I_{yd} , I_{y0} .

8.3. Содержание отчета

1. Формулировка и задачи работы.
2. Справочные параметры исследуемого тиристора и схема измерений.
3. Таблицы измеренных зависимостей.
4. Результаты вычислений.
5. Графики справочных и экспериментальных зависимостей.
6. Выводы о проделанной работе.

8.4. Контрольные вопросы

1. Каковы основные участки ВАХ тиристора?
2. При каком условии происходит включение тиристора?
3. Какие способы включения тиристора существуют?
4. Какими способами можно выключить тиристор?
5. Как меняется ВАХ тиристора при подаче тока управления?
6. Каковы основные параметры тиристора, и каков их смысл?
7. В чем разница между ВАХ тиристора, измеряемых с помощью генератора тока и генератора напряжения?

Список рекомендованной литературы

1. Сушков А. Д. Вакуумная электроника: Учеб. пособие. СПб.: Лань, 2004.
2. Электровакуумные приборы: Справ. М.: Энергоиздат, 1976.
3. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. Т. 1 и Т. 2. М.: Мир, 1984.
4. Лебедев А. И. Физика полупроводниковых приборов. М.: Физматлит, 2008.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ХАРАКТЕРИОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ.....	3
1.1. Принципы харктериографических исследований.....	3
1.2. Внешний вид и органы управления харктериографа.....	5
1.3. Подключение объектов исследования к харктериографу.....	11
1.4. Начало работы с харктериографом	16
2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОТБОРА КАТОДНОГО ТОКА В ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМПАХ.....	17
2.1. Основные понятия, термины и определения	17
2.2. Порядок выполнения работы.....	23
2.3. Контрольные вопросы и задания.....	29
3. ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМПАХ С СЕТКАМИ.....	30
3.1. Основные понятия, термины и определения.....	30
3.2. Порядок выполнения работы.....	35
3.3. Контрольные вопросы и задания.....	41
4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ.....	41
4.1. Основные теоретические положения.....	41
4.2. Программа работы и методические указания по ее выполнению....	49
4.3. Содержание отчёта.....	53
4.4. Контрольные вопросы.....	53
5. ИССЛЕДОВАНИЕ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА	54
5.1. Основные теоретические положения.....	54
5.2. Программа работы и методические указания по ее выполнению....	60
5.3. Содержание отчёта.....	66
5.4. Контрольные вопросы.....	66
6. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА С УПРАВЛЯЮЩИМ <i>p-n</i>-ПЕРЕХОДОМ.....	67
6.1. Основные теоретические положения.....	67
6.2. Программа работы и методические указания по ее выполнению....	71
6.3. Содержание отчёта.....	76
6.4. Контрольные вопросы.....	76
7. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРОМ.....	77

7.1.	Основные теоретические положения.....	77
7.2.	Программа работы и методические указания по ее выполнению....	83
7.3.	Содержание отчёта.....	90
7.4.	Контрольные вопросы.....	91
8.	ИССЛЕДОВАНИЕ ТИРИСТОРА.....	91
8.1.	Основные теоретические положения.....	91
8.2.	Программа работы и методические указания по ее выполнению....	95
8.3.	Содержание отчёта.....	97
8.4.	Контрольные вопросы.....	97
	Список рекомендованной литературы	98

Иванов Борис Викторович, Тупицын Александр Дмитриевич,
Шануренко Александр Константинович

Применение характеристиографа для исследования вакуумных и твердотельных приборов

Учебное пособие

Редактор О. Е. Сафонова

Подписано к печати 07.02.12. Формат 60x84 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Печ. л. 6,25 .
Тираж 90 экз. Заказ .

Издательство СПбГЭТУ “ЛЭТИ”
197376, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5