

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный
технический университет»

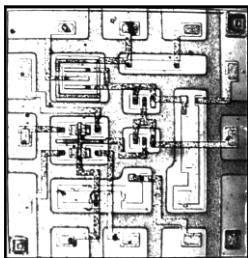
Кафедра полупроводниковой электроники и наноэлектроники

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ № 1 - 2 по дисциплине

«Физические основы электроники»

для студентов направления подготовки бакалавров
210100 «Электроника и наноэлектроника», профиля
«Микроэлектроника и твердотельная электроника»
заочной формы обучения



Воронеж 2013

Составитель канд. техн. наук Т.В. Свистова

УДК 621.382.2

Методические указания к выполнению лабораторных работ № 1 - 2 по дисциплине «Физические основы электроники» для студентов направления подготовки бакалавров 210100 «Электроника и наноэлектроника», профиля «Микроэлектроника и твердотельная электроника» заочной формы обучения / ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет»; сост. Т.В. Свистова. Воронеж, 2013. 43 с.

Методические указания содержат лабораторные работы, позволяющие ознакомиться с физическими принципами действия и рабочими характеристиками электровакуумных триодов и полупроводниковых диодов.

Методические указания предназначены для студентов третьего курса

Издание подготовлено в электронном виде в текстовом редакторе MS WORD XP и содержится в файле «Му_лр_1_ФОЭ.doc».

Табл. 2. Ил. 14. Библиогр.: 7 назв.

Рецензент канд. физ.-мат. наук, доц. Е.В. Бордаков

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

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

© ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2013

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум по дисциплине «Физические основы электроники» предназначен для освоения студентами методик измерения параметров и исследования характеристик электронных приборов, используемых для расчета их режимов работы и выявления влияния внешних воздействий на работу приборов.

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

Охватывая широкий круг научно-технических и производственных проблем, электроника опирается на достижения в различных областях знаний. При этом, с одной стороны, электроника ставит перед другими науками и производством новые задачи, стимулируя их дальнейшее развитие, и с другой – снабжает их качественно новыми техническими средствами и методами исследований.

Электронные приборы – устройства, в которых используются физические явления, связанные с движением заряженных частиц (ионов, электронов) в твердом теле, вакууме или газовой среде.

Все электронные приборы подразделяются на:

– электровакуумные приборы, в которых проводимость осуществляется посредством электронов или ионов, движущихся через вакуум или газ;

– полупроводниковые приборы, действие которых основано на использовании свойств полупроводников, в которых движение заряженных частиц происходит в твердом теле.

Наиболее распространенными типами электронных приборов являются:

а) электронно-управляемые лампы (диоды, триоды, пентоды и др.);

б) электронно-лучевые приборы (осциллографические трубки, кинескопы, потенциалоскопы, видиконы, суперортиконы и др.);

в) газоразрядные приборы (стабилитроны, тиратроны, декатроны и др.);

г) фотоэлектронные приборы (фотоэлементы, фотоэлектронные умножители, фоторезисторы, фототранзисторы и пр.);

д) полупроводниковые приборы (диоды, биполярные транзисторы, тиристоры, полевые транзисторы).

Основными направлениями развития электроники являются: вакуумная, твердотельная и квантовая электроника.

Вакуумная электроника – это раздел электроники, включающий исследования взаимодействия потоков свободных электронов с электрическими и магнитными полями в вакууме, а также методы создания электронных приборов и устройств, в которых это взаимодействие используется. К важнейшим направлениям исследования в области вакуумной электроники относятся: электронная эмиссия (в частности, термо- и фотоэлектронная эмиссия); формирование потока электронов и / или ионов и управление этими потоками; формирование электромагнитных полей с помощью устройств ввода и вывода энергии; физика и техника высокого вакуума и др.

Основные направления развития вакуумной электроники связаны с созданием электровакуумных приборов следующих видов: электронных ламп (диодов, триодов, тетродов и т.д.);

электривакуумных приборов сверхвысокой частоты (например, магнетронов, клистронов, ламп бегущей и обратной волны); электронно-лучевых и фотоэлектронных приборов (например, кинескопов, видиконов, электронно-оптических преобразователей, фотоэлектронных умножителей); газоразрядных приборов (например, тиратронов, газозарядных индикаторов).

Твердотельная электроника решает задачи, связанные с изучением свойств твердотельных материалов (полупроводниковых, диэлектрических, магнитных и др.), влиянием на эти свойства примесей и особенностей структуры материала; изучением свойств поверхностей и границ раздела между слоями различных материалов; созданием в кристалле разными методами областей с различными типами проводимости; созданием гетеропереходов и монокристаллических структур; созданием функциональных устройств микронных и субмикронных размеров, а также способов измерения их параметров.

Квантовая электроника охватывает широкий круг вопросов, связанных с разработкой методов и средств усиления и генерации электромагнитных колебаний на основе эффекта вынужденного излучения атомов и молекул. Основные направления квантовой электроники: создание оптических квантовых генераторов (лазеров), квантовых усилителей, молекулярных генераторов и др. Особенности приборов квантовой электроники следующие: высокая стабильность частоты колебаний, низкий уровень собственных шумов, большая мощность в импульсе излучения - они позволяют использовать их для создания высокоточных дальномеров, квантовых стандартов частоты, квантовых гироскопов, систем оптической многоканальной связи, дальней космической связи, медицинской аппаратуры, лазерной звукозаписи и воспроизведения и др. Созданы даже миниатюрные лазерные указки для сопровождения доклада или выступления.

Историю развития техники электронных приборов можно условно разделить на три периода.

Первый период относится к XIX столетию и может быть охарактеризован как время установления основных физических закономерностей работы электронных приборов и открытия явлений, стимулирующих их развитие и применение.

Второй период охватывает время с начала XX столетия до 1948 г., когда был изобретен транзистор. Этот период можно назвать периодом ламповой электроники. Именно в это время, в 1904 г., английский ученый Д. Флеминг изготовил первый вакуумный детекторный диод; в 1906 – 1907 гг. американский инженер Ли де Форест сконструировал трехэлектродную электронную лампу.

В России пионером внедрения электронных ламп был В.И. Коваленков, ученик А.С. Попова. В 1910 г. он создал первые отечественные диоды и триоды, а в 1911 г. предложил первую в мире конструкцию четырехэлектродной лампы – тетрод с катодной сеткой. В 1915 г. под руководством М.А. Бонч-Бруевича были разработаны (а с 1916 г. начали серийно выпускаться) высоковакуумные триоды. К середине 30-х годов ламповая электроника в основном сформировалась. К этому времени были созданы типы ламп, применяющиеся и в наши дни: тетрод (1924 г.), пентод (1930 г.), тиратрон (1929 г.), лучевой тетрод и серия многосеточных частотно-преобразовательных ламп (1935 г.).

Третий период начинается в 1948 г. и характеризуется бурным развитием полупроводниковой электроники. В 40-е – 60-е годы XX века были изобретены основные типы полупроводниковых приборов. Развитие полупроводниковой электроники связано с разработкой в 1948 году точечного транзистора (американские ученые Шокли, Бардин, Браттейн), в 1950 году – плоскостного биполярного транзистора, а в 1952 году - полевого (униполярного) транзистора. Наряду с транзисторами были разработаны и стали широко использоваться

другие различные виды полупроводниковых приборов: диоды различных классов и типов, варисторы, варикапы, тиристоры, оптоэлектронные приборы (светоизлучающие диоды, фотодиоды, фототранзисторы, оптроны, светодиодные и фотодиодные матрицы). Создание транзистора явилось мощным стимулом для развития исследований в области физики полупроводников и технологий полупроводниковых приборов. Для практической реализации развивающейся полупроводниковой электроники потребовались сверхчистые полупроводниковые и другие материалы и специальное технологическое и измерительное оборудование. Именно на этой базе стала развиваться микроэлектроника. Следует отметить, что основные принципы микроэлектроники – групповой метод и планарная технология – были освоены при изготовлении транзисторов в конце 50-х годов.

Основными направлениями твердотельной электроники являются: *полупроводниковая электроника*, связанная с разработкой различных видов полупроводниковых приборов, и *микроэлектроника*, связанная с разработкой интегральных схем.

Микроэлектроника является продолжением развития полупроводниковой электроники. В шестидесятые годы были разработаны полупроводниковые интегральные схемы (ИС), представляющие собой функционально законченные узлы радиоаппаратуры: логические элементы, усилители, генераторы и др. В интегральной микросхеме все или часть элементов нераздельно связаны и электрически соединены между собой так, что устройство рассматривается как единое целое. Это позволяет резко уменьшить размеры функциональных узлов и повысить надежность монтажа.

Первые разработки интегральных схем (ИС) относятся к 1958 – 1960 гг. В 1961 – 1963 гг. ряд американских фирм начали выпускать простейшие ИС. В то же время были разработаны пленочные ИС. Однако некоторые неудачи с разработ-

ками стабильных по электрическим характеристикам пленочных активных элементов привели к преимущественной разработке гибридных ИС. Отечественные ИС появились в 1962 – 1963 гг. Первые отечественные ИС были разработаны в ЦКБ Воронежского завода полупроводниковых приборов (схемы диодно-транзисторной логики по технологии с окисной изоляцией карманов). По технологии изготовления эти схемы уступали 2 года западным разработкам.

В историческом плане можно отметить 5 этапов развития микроэлектроники.

Первый этап, относящийся к первой половине 60-х годов, характеризуется степенью интеграции ИС до 100 элементов на кристалл и минимальным размером элементов порядка 10 мкм.

Второй этап, относящийся ко второй половине 60-х годов и первой половине 70-х годов, характеризуется степенью интеграции ИС от 100 до 1000 элементов/кристалл и минимальным размером элементов до 2 мкм.

Третий этап, начавшийся во второй половине 70-х годов, характеризуется степенью интеграции более 1000 элементов/кристалл и минимальным размером элементов до 1 мкм.

Четвертый этап характеризуется разработкой сверхбольших ИС со степенью интеграции более 10000 элементов/кристалл и размерами элементов 0,1 – 0,2 мкм.

Пятый, современный, этап характеризуется широким использованием микропроцессоров и микроЭВМ, разработанных на базе больших и сверхбольших ИС.

ОРГАНИЗАЦИЯ И ПРОВЕДЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

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

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

б) уяснить цель работы и порядок ее выполнения;

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

г) изучить методику выполнения измерений и проведения вычислений.

Лабораторные работы выполняют с соблюдением следующих требований:

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

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

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

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

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

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

При работе в лаборатории студенты должны:

строго соблюдать установленные правила внутреннего распорядка и техники безопасности;

бережно обращаться с оборудованием и измерительными приборами;

соблюдать следующие правила обращения с измерительными приборами:

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

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

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

сообщить преподавателю или лаборанту о неисправностях оборудования или измерительных приборов.

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

наименование, цель работы и используемое оборудование;

методику измерений в данной лабораторной работе;

краткие сведения об объектах измерения;

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

краткие выводы и заключения.

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

необходимо соблюдать следующие правила техники безопасности:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ОСНОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОВАКУУМНОГО ТРИОДА

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

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

Теоретическая часть

Триодом называют электронную лампу, в которой помимо анода и катода имеется третий электрод – сетка, управляющая потоком электронов, т.е. током лампы. Управляющая сетка располагается между анодом и катодом, вблизи последнего. Схематическое изображение триода приведено на рис. 1.1.

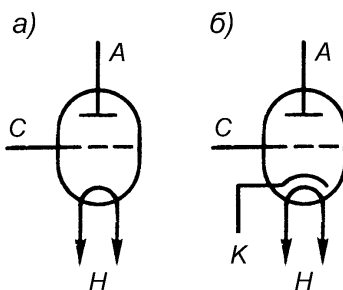


Рис. 1.1. Схематическое изображение триода с катодом прямого накала (а) и с катодом косвенного накала (б): А – анод, С – сетка, Н – подогреватель катода, К – катод

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

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

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

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

Статическими эти характеристики называются потому, что при их снятии все напряжения, кроме исследуемых, должны поддерживаться постоянными. Из рис. 1.2 видно, что при нулевом потенциале на сетке и заданном анодном напряжении U_{a2} в анодной цепи потечет ток I_{a2} . С увеличением отрицательного потенциала на сетке при том же U_{a2} анодный ток

уменьшится. На рис. 1.2 показаны запирающие напряжения U_{31} , U_{32} , U_{33} , когда ток анода равен нулю, для различных анодных напряжений. Увеличение или уменьшение анодного напряжения сдвигает характеристику соответственно влево или вправо относительно первоначальной.

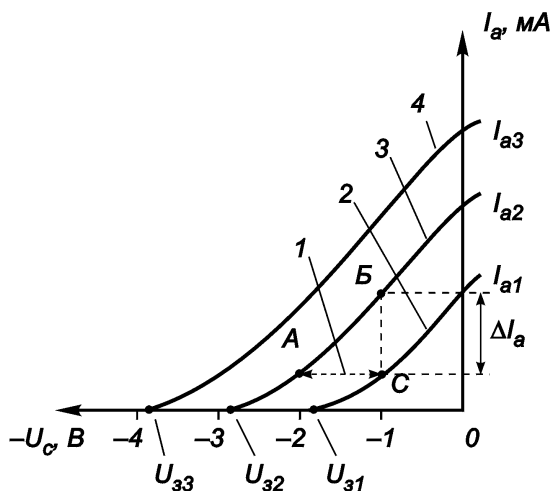


Рис. 1.2. Семейство анодно-сеточных характеристик триода:

1 – ΔU_c ; 2 – U_{a1} ; 3 – U_{a2} ; 4 – $U_{a3} > U_{a2}$

На рис. 1.3 представлено семейство анодных характеристик, снятых при различных напряжениях на сетке. При $U_c = 0$ характеристика триода подобна характеристике диода. При увеличении отрицательного напряжения на сетке характеристики сдвигаются вправо. При приложении к сетке положительного напряжения характеристики сдвигаются влево. При этом в сеточной цепи появляются сеточные токи I_c , возникающие за счет перераспределения тока эмиссии между анодом и сеткой.

С помощью статических характеристик выбирается режим работы триода и определяются его параметры, характе-

ризующие зависимость анодного и сеточного токов от анодного и сеточного напряжений. К ним относятся: крутизна характеристики, внутреннее сопротивление и коэффициент усиления.

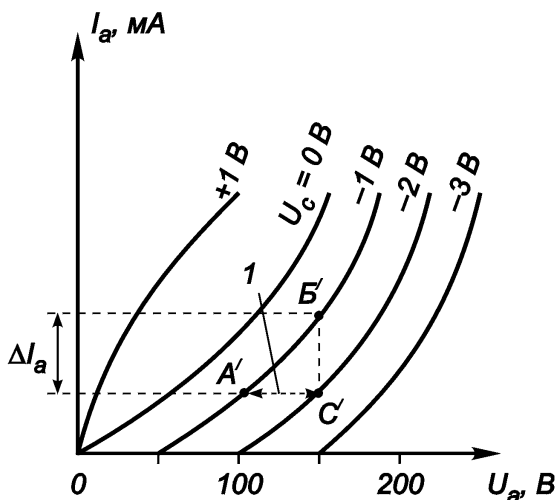


Рис. 1.3. Семейство анодных характеристик триода: $1 - \Delta U_a$

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

$$dI_a = \frac{\partial I_a}{\partial U_c} dU_c + \frac{\partial I_a}{\partial U_a} dU_a. \quad (1.1)$$

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

$$S = \left. \frac{\partial I_a}{\partial U_c} \right|_{U_a = \text{const}}. \quad (1.2)$$

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

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

$$R_i = \left. \frac{\partial U_a}{\partial I_a} \right|_{u_c = \text{const}}. \quad (1.3)$$

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

Поскольку в статическом режиме $dI_a = 0$, то уравнение (1.1) можно записать как

$$\frac{dU_a}{dU_c} = - \frac{\partial I_a}{\partial U_c} \cdot \frac{\partial U_a}{\partial I_a} = -SR_i, \quad (1.4)$$

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

$$\mu = \left. \frac{dU_a}{dU_c} \right|_{I_a = \text{const}} = SR_i. \quad (1.5)$$

Так как сетка находится ближе к катоду, то действие сеточного напряжения на электронный поток оказывается сильнее, чем действие анодного напряжения, и значения μ будет больше единицы. В зависимости от расположения электродов величина μ колеблется от 4 до 100.

Величина, обратная μ , называется *проницаемостью*

$$D = \frac{1}{\mu}. \quad (1.6)$$

Соотношение (1.7) связывает все три параметра триода и получило название *уравнение параметров лампы*.

$$SR_i = \mu, \quad (1.7)$$

а с учетом формулы (1.6) выражение (1.7) принимает вид

$$DSR_i = 1. \quad (1.8)$$

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

Параметры триода можно определить по статическим характеристикам с помощью так называемого *характеристического треугольника* (АВС на рис. 1.2 и А'В'С' на рис. 1.3), построенного на средней части характеристики. По рис. 1.2 определяется значение $S = \Delta I_a / \Delta U_c$, а по рис. 1.3 – значение $R_i = \Delta U_a / \Delta I_a$.

Со всеми введенными обозначениями параметров лампы уравнение (1.1) можно записать как

$$dI_a = S dU_c + \frac{1}{R_i} dU_a \quad (1.9)$$

или

$$dI_a = \frac{1}{R_i} (dU_c + dU_a). \quad (1.10)$$

Уравнение (1.10) называется **основным уравнением триода** и показывает влияние приращения анодного и сеточного напряжения на приращение анодного тока. Это уравнение используется при анализе работы любых ламповых схем.

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

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

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

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

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

Конструкция и значение параметров современных триодов чрезвычайно разнообразны и определяются главным образом их назначением. Триоды используются в различной радиоэлектронной аппаратуре на частотах до 10 ГГц в основном

для генерирования электрических колебаний, усиления напряжения и мощности, а также для детектирования.

Недостатком триода является малый коэффициент усиления. Для его повышения можно увеличить частоту намотки управляющей сетки, но при этом уменьшится запирающее напряжение, и анодно-сеточная характеристика смещается вправо, где работа усилительной лампы становится затруднительной из-за возрастания сеточного тока. Кроме того, в триоде относительно велика проходная емкость C_{ac} , ухудшающая работу усилителя.

Схема исследований, необходимые приборы

Схема исследования триода приведена на рис. 1.4. В схему исследования триода входят три источника напряжения: накала, анода, управляющей сетки. Напряжения питания накала и анода могут быть получены от блока питания типа УИП-2, сетки от источника питания постоянного тока Б5-49.

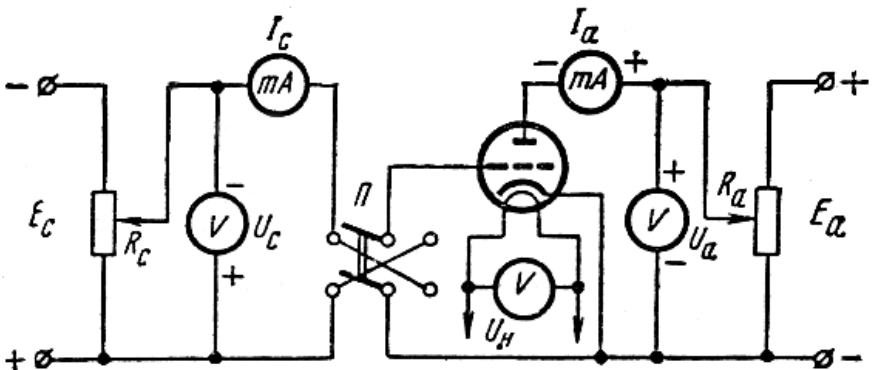


Рис. 1.4 . Схема исследования триода

Основные параметры некоторых триодов приведены в табл. 1.1, а их цоколевки показаны на рис. 1.5.

Таблица 1.1

Основные параметры триодов

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

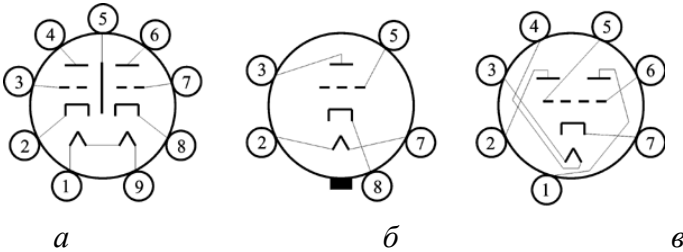


Рис. 1.5. Цоколевка триодов: а – двойной триод 6НЗП: 1, 9 – подогреватель катода, 2 – катод первого триода, 3 – сетка первого триода, 4 – анод первого триода, 5 – экран, 6 – анод второго триода, 7 – сетка второго триода, 8 – катод второго триода; б – триод 6С2С: 2, 7 – подогреватель катода, 3 – анод, 5 – сетка, 8 – катод; в – триод 6Н15П: 1, 2 – аноды, 5, 6 – сетка, 3, 4 – подогреватель катода, 7 – катод

Порядок выполнения работы

1. Записать паспортные данные и зарисовать цоколевку исследуемого триода.

2. Снятие статических анодных и анодно-сеточных характеристик.

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

Измерения производят следующим образом. Переключатель «Тип лампы» стенда устанавливают в положение «Тр» (триод). Напряжение на сетку подается от источника питания постоянного тока Б5-49, на котором необходимо задать следующий режим: напряжение 24,9 В и ток 99 мА. Стабилизация должна быть по напряжению. Чтобы более плавно регулировать напряжение сетки, напряжение на Б5-49 можно уменьшать до 10 В. Величина напряжения на сетке регулируется на стенде ручкой «Регулировка напряжения сетки», а полярность – тумблером «Полярность сетки». При этом переключатель «Тип электрода» должен находиться в положении «Сетка», а переключатель «Ток – напряжение» – в положении $U_{\max} = 20,00$ В. Задают $U_c = 0$ В, устанавливают переключатель «Тип электрода» в положение «А» (анод), переключатель «Ток – напряжение» – в положение $U_{\max} = 200,0$ В. Далее ручкой «Напряжение анода» на источнике питания УИП-2 изменяют напряжение на аноде в интервале от 10 до 115 В, фиксируя ток анода. Для этого переключатель «Ток – напряжение» устанавливают в положение «Ток» при каждом значении анодного напряжения. Результаты измерений заносят в табл. 1.2.

Далее на управляющую сетку подают отрицательное относительно катода напряжение U_c в интервале от -1 до -4 В. Для этого переключатель «Тип электрода» переводят в положение «Сетка»; «Полярность сетки» – на «-», «Ток – напря-

жение» – в положение $U_{\text{макс}} = 20,00$ В и рукояткой «Регулировка напряжения сетки» задают значения напряжения на сетке, например, $U_c = -1$ В. Затем переключатель «Тип электрода» переводят в положение «А» (анод), переключатель «Ток – напряжение» – в положение $U_{\text{макс}} = 200,0$ В. Изменяя анодное напряжение от нуля через интервалы в 10 – 20 В до максимального значения, фиксируют анодный ток, переводя переключатель «Ток – напряжение» в положение «Ток» и учитывая пределы измерения тока.

Таблица 1.2

Результаты измерения статических анодных
и анодно-сеточных характеристик
 $I_a = f(U_a)$ при $U_c = \text{const}$, $U_n = \text{const}$
 $I_a = f(U_c)$ при $U_a = \text{const}$, $U_n = \text{const}$

$U_c, \text{ В}$	$I_a, \text{ мА}$				
	$U_{a1}, \text{ В}$	$U_{a2}, \text{ В}$	$U_{a3}, \text{ В}$...	$U_{an}, \text{ В}$
$U_c = 0$					
$U_c < 0$					
$U_c > 0$					

Аналогичные измерения производят для 3 – 4 значений отрицательного потенциала на сетке. Затем изменяют полярность напряжения на сетке на «+», устанавливают $U_c = 1$ В. Изменяя напряжение на аноде в интервале от 10 до 70 В, фиксируют ток анода. При $U_c > 0$ ток анода резко возрастает. При изменении U_a напряжение на сетке необходимо проверять и поддерживать постоянным. При положительной полярности напряжения на сетке $U_c > 1$ В не задавать!

3. Построение графиков анодно-сеточных и анодных статических характеристик, определение параметров триода.

Графики анодно-сеточных и анодных анодных статических характеристик строят на основании результатов, записанных в табл. 1.2. Определение параметров триода S , R_i и μ производят в семействе анодно-сеточных и анодных статических характеристик для некоторой произвольной точки, лежащей на прямолинейной части одной из этих характеристик, путем построения характеристических треугольников, формулы (1.2), (1.3), (1.5).

Содержание отчета

Отчет о проделанной работе должен содержать:

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

Контрольные вопросы

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

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

Цель работы: экспериментальное изучение вольт-амперных характеристик (ВАХ) диодов; определение их основных параметров.

Используемое оборудование и материалы: характеристикограф, выпрямительные диоды, стабилитроны, туннельные диоды.

Теоретическая часть

Полупроводниковым диодом называют нелинейный электронный прибор с двумя выводами. В зависимости от внутренней структуры, типа, количества и уровня легирования внутренних элементов диода и вольт-амперной характеристики, свойства полупроводниковых диодов бывают различными.

Полупроводниковые диоды могут отличаться друг от друга, например, по следующим признакам:

а) по применяемым исходным материалам (германиевые, кремниевые, на арсениде галлия и др.);

б) по структуре перехода (точечные и плоскостные);

в) по технологии изготовления (сплавные, диффузионные, эпитаксиальные и др.);

г) по функциональному назначению (выпрямительные, детекторные, импульсные и т. д.);

д) по частотному диапазону (низкочастотные, высокочастотные и сверхвысокочастотные);

е) по мощности рассеяния (маломощные, средней мощности и мощные);

ж) по конструктивному оформлению (стеклянные, металлические, металлокерамические, пластмассовые).

Выпрямительными называют диоды, предназначенные для выпрямления переменного тока. Основу выпрямительного

диода составляет обычный электронно-дырочный переход. Вольт-амперная характеристика такого диода, приведенная на рис. 2.1, *а*, имеет ярко выраженную нелинейность и описывается уравнением

$$J = J_s (e^{\beta V_G} - 1). \quad (2.1)$$

В прямом смещении ток диода инжекционный, большой по величине и представляет собой диффузионную компоненту тока основных носителей. При обратном смещении ток диода маленький по величине и представляет собой дрейфовую компоненту тока неосновных носителей. В состоянии равновесия суммарный ток, обусловленный диффузионными и дрейфовыми токами электронов и дырок, равен нулю:

$$j_{pE} - j_{nD} + j_{nE} - j_{pD} = 0. \quad (2.2)$$

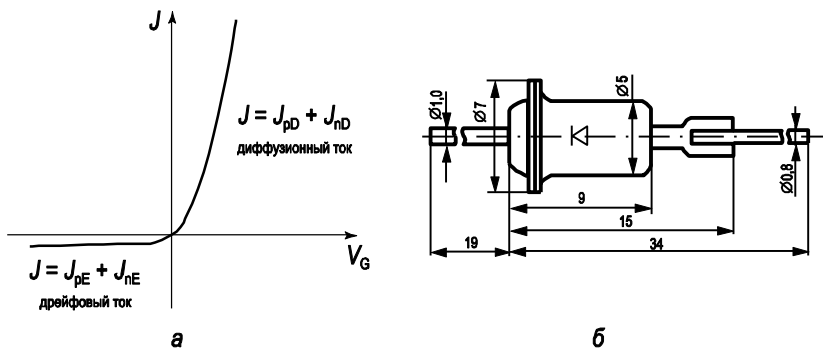


Рис. 2.1. Выпрямительный диод:
а - вольт-амперная характеристика;
б - конструкция корпуса

В качестве полупроводниковых материалов для выпрямительных диодов используют германий и кремний. В выпрямительных диодах используются плоскостные несимметричные *p-n*-переходы, причем для германиевых диодов они создаются главным образом сплавным способом, а для крем-

ниевых – сплавным и диффузионным. Для выпрямительных диодов характерно, что они имеют малые сопротивления в проводящем состоянии, поэтому позволяют пропускать большие токи. Так как площадь p - n -перехода большая, то барьерная емкость этих диодов будет большой, достигая значений десятков пикофарад.

Полупроводниковые выпрямительные диоды обычно характеризуются следующими основными параметрами:

- **постоянный обратный ток** $I_{обр}$ (мкА; мА) при некоторой величине постоянного обратного напряжения $U_{обр}$;
- **постоянное прямое напряжение** $U_{пр}$ при постоянном прямом токе $I_{пр}$ (мА; А).

При серийном выпуске выпрямительных диодов в технических условиях на них указываются средние значения параметров: $I_{обр. ср.}$ при $U_{обр. макс.}$ и $U_{пр. ср.}$ при $I_{пр. ср. макс.}$.

В технических условиях на выпрямительные диоды приводятся предельно допустимые электрические режимы эксплуатации: максимально-допустимое амплитудное значение обратного напряжения $U_{обр. макс.}$ (В), средний прямой ток $I_{пр. ср.}$ (А).

Для анализа приборных характеристик выпрямительного диода важными также являются такие дифференциальные параметры, как **коэффициент выпрямления**, характеристические сопротивления и емкости диода в зависимости от выбора рабочей точки.

Различают два вида характеристического сопротивления диодов: **дифференциальное сопротивление** r_D и **сопротивление по постоянному току** R_D .

Дифференциальное сопротивление определяется как

$$r_D = \frac{dU}{dI} = \left[\frac{dI}{dU} \right]^{-1} = \beta j_s e^{\beta V} + j_s - j_s = \beta (I + I_s)^{-1} = \frac{kT/q}{I + I_s}. \quad (2.3)$$

На прямом участке вольт-амперной характеристики диода дифференциальное сопротивление r_D невелико и составляет значение несколько Ом. Действительно, при значении прямого тока диода $I = 25$ мА и значении теплового потенциала $kT/q = 25$ мВ величина дифференциального сопротивления r_D будет равна $r_D = 1$ Ом. На обратном участке вольт-амперной характеристики диода дифференциальное сопротивление r_D стремится к бесконечности, поскольку в идеальных диодах при обратном смещении ток не зависит от напряжения.

Сопротивление по постоянному току R_D определяется как отношение приложенного напряжения U к протекающему току I через диод:

$$R_D = \frac{U}{I} = \frac{U}{I_0(e^{\beta U} - 1)}. \quad (2.4)$$

На прямом участке вольт-амперной характеристики сопротивление по постоянному току больше, чем дифференциальное сопротивление $R_D > r_D$, а на обратном участке – меньше $R_D < r_D$.

В точке вблизи нулевого значения напряжения $U \ll kT/q$ значения сопротивления по постоянному току и дифференциального сопротивления совпадают. Действительно, разложив экспоненту в ряд в соотношении (2.4), получаем

$$R_D = \frac{kT}{q} \frac{1}{I_0} = r_D. \quad (2.5)$$

Используя характерное значение для обратного тока диода $I_0 = 25$ мкА, получаем величину сопротивления диода в нулевой точке $R_{D0} = r_{D0} = 1$ кОм.

Коэффициент выпрямления идеального диода на основе p - n перехода K рассчитаем по уравнению (2.1) как отношение прямого тока к обратному току диода. Получаем

$$K = \frac{J^+}{J^-} = \frac{e^{\beta V_G} - 1}{e^{-\beta V_G} - 1}. \quad (2.6)$$

Как следует из соотношения (2.6), при значениях переменного напряжения, модуль которого V_G меньше, чем тепловой потенциал kT/q , полупроводниковый диод не выпрямляет переменный ток. Коэффициент выпрямления достигает приемлемых величин при значениях V_G по крайней мере в 4 раза больших, чем тепловой потенциал kT/q , что при комнатной температуре $T = 300$ К соответствует значению напряжения $V_G = \pm 0,1$ В.

Стабилитроном называется полупроводниковый диод, предназначенный для стабилизации уровня напряжения в схеме. Для этого используются приборы, у которых на вольт-амперной характеристике имеется участок со слабой зависимостью напряжения от проходящего тока. Такой участок обуславливается электрическим пробоем p - n -перехода при включении диода в обратном направлении. ВАХ стабилитрона имеет вид, представленный на рис. 2.2, а. Подобной вольт-амперной характеристикой обладают сплавные диоды с базой, изготовленной из низкоомного полупроводникового материала. При этом напряженность электрического поля в p - n -переходе стабилитрона значительно выше, чем у обычных диодов. При относительно небольших обратных напряжениях в p - n -переходе возникает сильное электрическое поле, вызывающее его электрический пробой. Напряжение, при котором происходит лавинный пробой, зависит от удельного сопротивления полупроводникового материала. С ростом удельного сопротивления напряжение лавинного пробоя увеличивается.

Так как кремниевые диоды имеют меньшее значение обратного тока, обладают большей устойчивостью к тепловому пробую, чем германиевые диоды, поэтому в качестве стабилитронов применяют только кремниевые диоды.

Основными электрическими параметрами стабилитрона являются (в скобках даны их типовые значения):

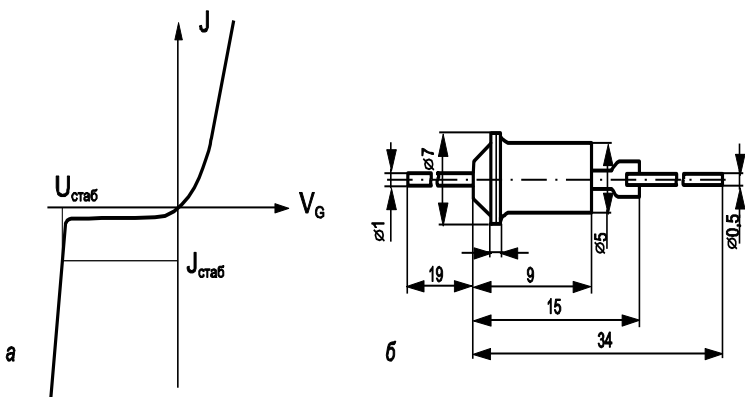


Рис. 2.2. Вольт-амперная характеристика (а) и конструкция корпуса (б) стабилизатора

- **напряжение стабилизации** U_{cm} – падение напряжения на стабилизаторе при протекании заданного тока стабилизации (несколько вольт – сотни вольт);

- **ток стабилизации** I_{cm} – номинальное значение тока, протекающего через стабилизатор, определяющее напряжение стабилизации (несколько мА – несколько А);

- **разброс величины напряжения стабилизации** ΔU_{cm} при протекании заданного тока стабилизации (несколько единиц процента);

- **дифференциальное** или **динамическое сопротивление** r_{cm} , которое определяется при заданном значении тока стабилизации на участке пробоя как

$$r_{cm} = \frac{dU_{cm}}{dI_{cm}}. \quad (2.7)$$

Дифференциальное сопротивление определяет наклон обратной ветви вольт-амперной характеристики стабилизатора. Величина r_{cm} колеблется в пределах от 1 до 1000 Ом;

- **температурный коэффициент напряжения стабилизации** TKU_{cm} – относительное изменение напряжения стабилизации $\Delta U_{cm} / U_{cm}$ к изменению температуры окружающей среды на ΔT , т.е. при изменении температуры окружающей среды на один градус при постоянном значении тока стабилизации (плюс - минус сотые – тысячные доли процента на градус):

$$TKU_{cm} = \frac{\Delta U_{cm}}{U_{cm} \Delta T} 100, [\%/град]. \quad (2.8)$$

Кроме того, для стабилитронов существуют следующие предельно-допустимые параметры:

- максимально-допустимый ток стабилизации в диапазоне температур $I_{cm. макс}$ (десятки мА – единицы А);

- минимальный ток стабилизации в диапазоне температур $I_{cm. мин}$ (от 1 – 3 мА);

- максимально-допустимая мощность в диапазоне окружающей температуры $P_{макс}$ (от нескольких милливатт до нескольких ватт);

- полное тепловое сопротивление стабилитрона R_{Tn-c} , т.е. тепловое сопротивление переход–среда:

$$R_{Tn-c} = \frac{T_c - T_n}{P_{макс}} [°C/Вт], \quad (2.9)$$

где T_c , T_n – температура среды и перехода соответственно.

Разброс по R_{Tn-c} составляет от десятков до сотен градусов на ватт.

При достижении напряжения на стабилитроне, называемого напряжением стабилизации $U_{стаб}$, ток через стабилитрон резко возрастает. Дифференциальное сопротивление $r_{ст}$ идеального стабилитрона на этом участке ВАХ стремится к 0, в

реальных приборах величина $r_{ст}$ составляет значение $r_{ст} \approx 2 \div 50 \text{ Ом}$.

Основное назначение стабилитрона – стабилизация напряжения на нагрузке, при изменяющемся напряжении во внешней цепи. В связи с этим последовательно со стабилитроном включают нагрузочное сопротивление, демпфирующее изменение внешнего напряжения. Поэтому стабилитрон называют также опорным диодом.

Напряжение стабилизации $U_{стаб}$ зависит от физического механизма, обуславливающего резкую зависимость тока от напряжения. Различают два физических механизма, ответственных за такую зависимость тока от напряжения, – лавинный и туннельный пробой p - n перехода. Для стабилитронов с туннельным механизмом пробоя напряжение стабилизации $U_{стаб}$ невелико и составляет величину менее 5 вольт: $U_{стаб} < 5 \text{ В}$. Для стабилитронов с лавинным механизмом пробоя напряжение стабилизации обычно имеет большие значения и составляет величину более 8 вольт: $U_{стаб} > 8 \text{ В}$.

Прямая ветвь вольт-амперной характеристики кремниевых диодов, в том числе стабилитронов, имеет крутой подъем, поэтому для стабилизации малых напряжений (порядка 0,8 – 1,5 В) можно использовать кремниевые диоды, включенные в прямом направлении. Такие приборы называют **стабисторами**.

Отечественная промышленность выпускает кремниевые стабилитроны на напряжение стабилизации от 5 до 300 В при токе стабилизации от 0,1 мА до 2 А и при рассеиваемой мощности от 0,15 до 50 Вт.

Туннельным диодом называют полупроводниковый диод на основе p^+ - n^+ перехода с сильнолегированными областями, на прямом участке вольт-амперной характеристики которого наблюдается n -образная зависимость тока от напряжения. На рис. 2.3, а приведена вольт-амперная характеристика типичного туннельного диода при прямом смещении.

Проанализируем особенности вольт-амперной характеристики туннельного диода. Для этого рассмотрим $p^+ - n^+$ переход, образованный двумя вырожденными полупроводниками.

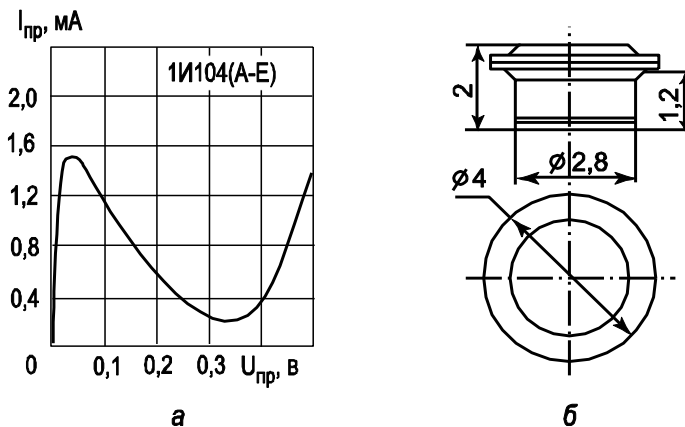


Рис. 2.3 Туннельный диод 1И104:
 а - вольт-амперная характеристика при прямом смещении;
 б - конструкция туннельного диода

Если концентрация доноров N_D и акцепторов N_A в эмиттере и базе диода будет порядка 10^{20} см^{-3} , то концентрация основных носителей будет много больше эффективной плотности состояний в разрешенных зонах $p_{p0}, n_{n0} \gg N_C, N_V$. В этом случае уровень Ферми будет находиться в разрешенных зонах p^+ и n^+ полупроводников.

В полупроводнике n^+ -типа все состояния в зоне проводимости вплоть до уровня Ферми заняты электронами, а в полупроводнике p^+ -типа – дырками. Зонная диаграмма $p^+ - n^+$ перехода, образованного двумя вырожденными полупроводниками, приведена на рис. 2.4.

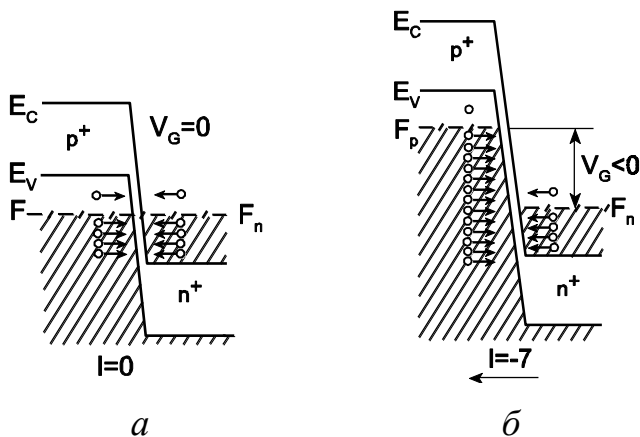


Рис. 2.4. Зонная диаграмма p^+-n^+ перехода в состоянии равновесия (а) и при обратном смещении (б)

С позиции анализа токов для диффузионного тока (прямого) имеет место большая высота потенциального барьера. Чтобы получить типичные значения прямого тока, нужно приложить большое прямое напряжение (больше или примерно равное половине ширины запрещенной зоны $E_g/2$). В выражении для дрейфового тока (обратного) концентрация неосновных носителей

основных носителей $\left(p_{n0} = \frac{n_i^2}{N_D} \right)$ мала и поэтому обратный ток тоже будет мал. Геометрическая ширина вырожденного $p-n$ перехода сравнима с дебройлевской длиной волны электрона. В этом случае в вырожденном p^+-n^+ переходе можно ожидать проявления квантово-механических эффектов, одним из которых является туннелирование через потенциальный барьер. При узком барьере вероятность туннельного просачивания через барьер отлична от нуля.

Рассмотрим более подробно туннельные переходы в вырожденных p^+-n^+ переходах при различных напряжениях. На рис. 2.4, б показана зонная диаграмма p^+-n^+ перехода при обратном смещении. При обратном напряжении ток в диоде

обусловлен туннельным переходом электронов из валентной зоны p^+ -области на свободные места в зоне проводимости n^+ -области. Поскольку концентрация электронов и число мест велики, то туннельный ток резко возрастает с ростом обратного напряжения. Такое поведение вольт-амперных характеристик резко отличает туннельный диод от обычного выпрямительного диода.

При прямом напряжении ток в диоде обусловлен туннельным переходом электронов из зоны проводимости n^+ -области на свободные места в валентной зоне p^+ -области. Поскольку туннельные переходы происходят без рассеяния, то есть с сохранением энергии туннелирующей частицы, то на зонной диаграмме эти процессы будут отражены прямыми горизонтальными линиями. На рис. 2.5 показаны зонные диаграммы туннельного диода при прямом смещении, соответствующие различным участкам прямой ветви вольт-амперной характеристики.

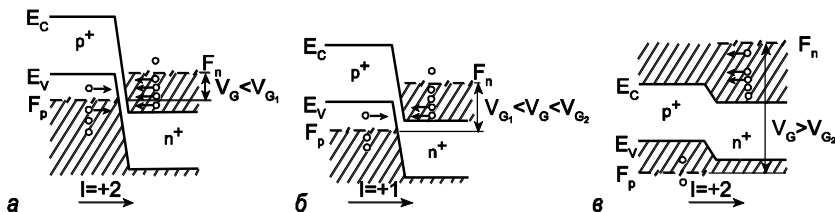


Рис. 2.5. Зонные диаграммы туннельного диода при прямом смещении:

а - участок 1; *б* - участок 2; *в* - участок 3

На участке 1 при небольшом прямом напряжении напротив электронов зоны проводимости начинают появляться свободные места в валентной зоне при той же самой энергии. По мере роста напряжения число свободных мест возрастает и ток растет с ростом напряжения. Туннельный ток достигает максимума, когда все свободные места в валентной зоне оказываются по энергии напротив энергетических уровней, заня-

тых электронами в зоне проводимости (участок 2). Затем по мере роста прямого напряжения число этих свободных мест начинает уменьшаться, поскольку по энергии напротив уровней, занятых электронами в зоне проводимости, оказываются состояния в запрещенной зоне (энергетические уровни в идеальных полупроводниках в запрещенной зоне отсутствуют). На участке 3 туннельный ток уменьшается с ростом напряжения и превращается в ноль, когда запрещенная зона p^+ полупроводника будет находиться по энергии напротив уровней, занятых электронами в зоне проводимости.

При дальнейшем росте прямого напряжения появляется компонента обычного диффузионного тока p - n перехода.

Рассмотрим вольт-амперные характеристики p - n перехода в особом случае, когда энергия Ферми в электронном и дырочном полупроводниках совпадает или находится на расстоянии $\pm kT/q$ от дна зоны проводимости или вершины валентной зоны. В этом случае вольт-амперные характеристики такого диода при обратном смещении будут точно такие же, как и у туннельного диода, то есть при росте обратного напряжения будет быстрый рост обратного тока. Что касается тока при прямом смещении, то туннельная компонента ВАХ будет полностью отсутствовать в связи с тем, что нет полностью заполненных состояний в зоне проводимости. Поэтому при прямом смещении в таких диодах до напряжений, больше или равных половине ширины запрещенной зоны, ток будет отсутствовать. С точки зрения выпрямительного диода вольт-амперная характеристика такого диода будет инверсной, то есть будет высокая проводимость при обратном смещении и малая при прямом. В связи с этим такого вида туннельные диоды получили название *обращенных диодов*. На рис. 2.6 приведена вольт-амперная характеристика обращенного диода.

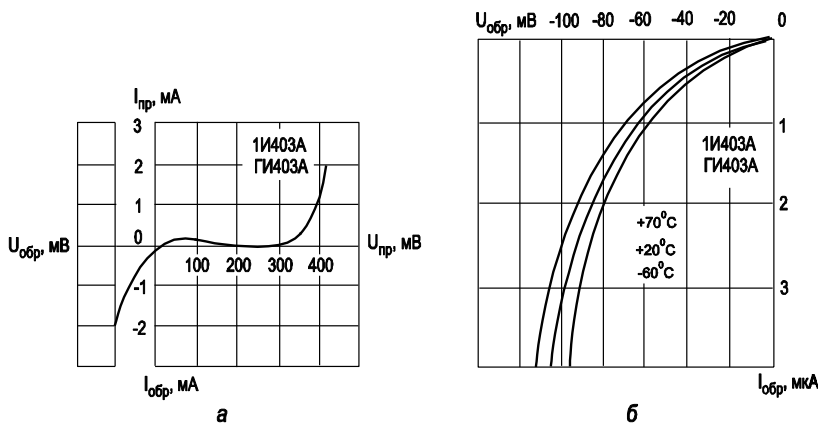


Рис. 2.6. Вольт-амперная характеристика германиевого обращенного диода ГИ403: *а* - полная ВАХ; *б* - обратный участок ВАХ при разных температурах

Таким образом, *обращенный диод* – это туннельный диод без участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Высокая нелинейность вольт-амперной характеристики при малых напряжениях вблизи нуля (порядка микровольт) позволяет использовать этот диод для детектирования слабых сигналов в СВЧ-диапазоне.

Экспериментальное задание

Записать типы и марки исследуемых диодов. Проанализировать полярности напряжений необходимых для достижения прямого и обратного включения. Ознакомиться с порядком работы с характериографом (см. Приложение).

1. Подключить выпрямительный диод к характериографу и установить тумблерами полярности напряжений, необходимых для достижения прямого включения. Зарисовать осциллограмму характеристики диода. Установить тумблерами полярности напряжений, необходимых для достижения обратного включения. Зарисовать осциллограмму характери-

ки диода. По характеристике определить параметры выпрямительного диода: $I_{обр}$ - постоянный обратный ток при некоторой величине постоянного обратного напряжения $U_{обр}$; $U_{пр}$ - постоянное прямое напряжение при постоянном прямом токе $I_{пр}$ (мА; А); прямое и обратное дифференциальное сопротивление $r_{D пр} = \Delta U_{пр} / \Delta I_{пр}$ и $r_{D обр} = \Delta U_{обр} / \Delta I_{обр}$; прямое и обратное сопротивление по постоянному току $R_{D пр} = U_{пр0} / I_{пр0}$ и $R_{D обр} = U_{обр0} / I_{обр0}$ (см. рис. 2.7).

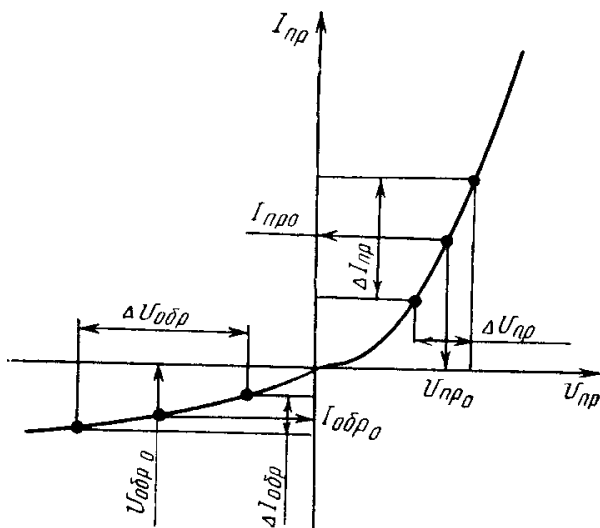


Рис. 2.7. Определение приращений токов и напряжений по вольт-амперной характеристике выпрямительного диода

2. Подключить стабилитрон к характериографу и установить тумблерами полярности напряжений, необходимых для достижения прямого включения. Зарисовать осциллограмму характеристики стабилитрона. Установить тумблерами полярности напряжений, необходимых для достижения

обратного включения. Зарисовать осциллограмму характеристики стабилитрона. По характеристике определить параметры стабилитрона: $U_{ст}$ - напряжение стабилизации; $I_{ст}$ - ток стабилизации; $\Delta U_{ст}$ - разброс величины напряжения стабилизации; $r_{ст}$ - дифференциальное или динамическое сопротивление по формуле (2.7) и коэффициент стабилизации k по формуле $k = \frac{\Delta U_{вх}}{\Delta U_{ст}} \cdot \frac{U_{ст}}{U_{вх}}$ (см. рис. 2.8).

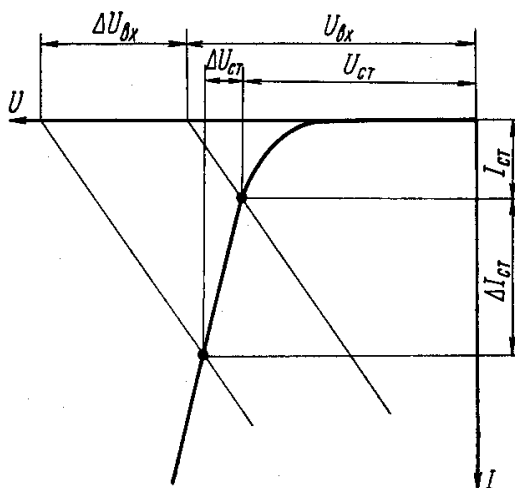


Рис. 2.8. Определение параметров стабилитрона по вольт-амперной характеристике

3. Подключить туннельный диод к характериографу и установить тумблерами полярности напряжений, необходимых для достижения прямого включения. Зарисовать осциллограмму характеристики диода. Установить тумблерами полярности напряжений, необходимых для достижения обратного включения. Зарисовать осциллограмму характеристики диода. По характеристике определить параметры туннельного

диода: $I_{\text{макс}}$ - ток в максимуме характеристики; $I_{\text{мин}}$ - ток в минимуме характеристики; $U_{\text{макс}}$ - напряжение на диоде при $I_{\text{макс}}$; $U_{\text{мин}}$ - напряжение на диоде при $I_{\text{мин}}$; $U_{\text{н}}$ - напряжение на диоде при $I_{\text{макс}}$ на диффузионной ветви характеристики; $\Delta I = I_{\text{макс}} - I_{\text{мин}}$; $\Delta U = U_{\text{н}} - U_{\text{макс}}$; интегральное отрицательное сопротивление $R = (U_{\text{макс}} - U_{\text{мин}})/(I_{\text{макс}} - I_{\text{мин}})$; минимальное отрицательное дифференциальное сопротивление $r_{\text{д мин}} = \Delta U/\Delta I$; отношение токов $I_{\text{макс}}/I_{\text{мин}}$ (см. рис. 2.9)

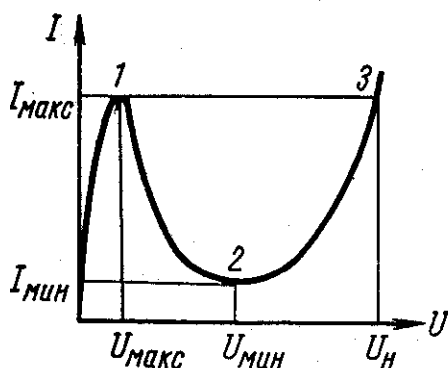


Рис. 2.9. Определение параметров туннельного диода по вольт-амперной характеристике

Содержание отчета

Отчет о проделанной работе должен содержать:

1. Точное наименование и цель работы.
2. Таблицу основных (паспортных) данных исследуемых диодов.
3. Графики вольт-амперных характеристик полупроводниковых диодов
4. Расчет параметров полупроводниковых диодов
8. Краткие выводы.

Контрольные вопросы

1. Какой полупроводниковый прибор называют диодом?
2. Приведите классификацию полупроводниковых диодов.
3. Приведите вольт-амперную характеристику выпрямительного диода.
4. Назовите основные электрические параметры выпрямительного диода.
5. Какой диод называют стабилитроном, стабистором?
6. Приведите ВАХ стабилитрона.
7. Назовите основные электрические параметры стабилитрона.
8. Какие виды пробоев используются в стабилитронах?
9. Что такое туннельный эффект?
10. Расскажите о принципе действия туннельного диода.
11. Нарисуйте энергетическую диаграмму $p - n$ -перехода туннельного диода в состоянии термодинамического равновесия.
12. Нарисуйте энергетическую диаграмму $p - n$ -перехода туннельного диода при прямом смещении.
13. Нарисуйте энергетическую диаграмму $p - n$ -перехода туннельного диода при обратном смещении.
14. Нарисуйте вольт-амперную характеристику туннельного диода.
15. Назовите основные электрические параметры туннельного диода.
16. Какой диод называют обращенным?

ПРИЛОЖЕНИЕ

ПОРЯДОК РАБОТЫ С ХАРАКТЕРИОГРАФОМ

Характериограф предназначен для наблюдения выходной статической вольт-амперной характеристики на экране осциллографа и состоит из блока характерографа и осциллографа. Принцип действия его состоит в следующем.

Пусть исследуемый прибор представлен в общем виде как четырехполюсник, у которого один провод является общим для входа и выхода. Упрощенная схема измерения показана на рис. П.1.



Рис. П.1. Упрощенная схема характерографа. Испытуемый прибор представлен четырехполюсником.
СМ – схема масштабирования координаты X

Для снятия выходной ВАХ напряжение развертки, то есть переменное напряжение требуемой полярности, с блока характерографа подается одновременно на выход четырехполюсники и на вход горизонтальной развертки осциллографа (клеммы $U_{вых}$, оси X). Обратим внимание на то, что обычно в режиме наблюдения зависимости сигнала от времени горизонтальная развертка осциллографа осуществляется его собственным генератором пилообразного напряжения. Для сня-

тия ВАХ, когда управление горизонтальной разверткой должно быть передано блоку характеристикографа, необходимо поставить переключатель ВХОД X на осциллографе в соответствующее положение. На вход вертикальной развертки осциллографа надо подать ток через прибор. Однако ввиду высокого входного сопротивления осциллографа ток измеряется как падение напряжения на известном резисторе нагрузки R_n , подаваемое на ось Y (клемма оси Y). Наконец, чтобы можно было наблюдать зависимость выходной характеристики исследуемого прибора от управляющего сигнала, на вход четырехполюсника подается постоянное напряжение (клемма U_{ex}), а втекающий при этом в четырехполюсник постоянный ток I_{ex} измеряется миллиамперметром.

Какая конкретно из выходных характеристик будет сниматься – зависит от включения измеряемого прибора, представленного здесь в виде четырехполюсника. Например, при включение транзистора по схеме с общим эмиттером (рис. П.2, *а*) будет сниматься зависимость $I_k(U_{кэ})$. Если измеряемый прибор не имеет цепей управления, то входные клеммы не используются (рис. П.2, *б*). Если измеряемый прибор управляется полем пример, полевой транзистор, (рис. П.2, *в*), то ток в его входной цепи протекать не должен, а входное напряжение может быть измерено на клеммах U_{ex} .

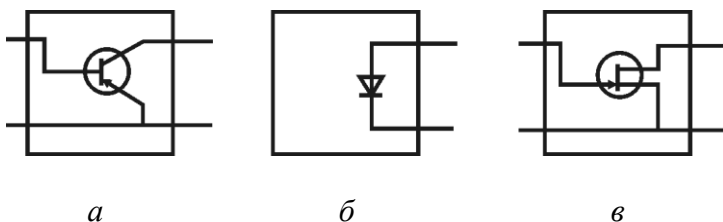


Рис. П.2. Варианты включения используемых приборов:
а – биполярный транзистор в схеме с общим эмиттером;
б – диод; *в* – полевой транзистор с общим истоком

Лицевая панель блока характериографа показана на рис. П.3. Она может быть разделена на четыре части: ОСЦИЛЛОГРАФ, ВХОД, ПОДЛОЖКА и ВЫХОД.

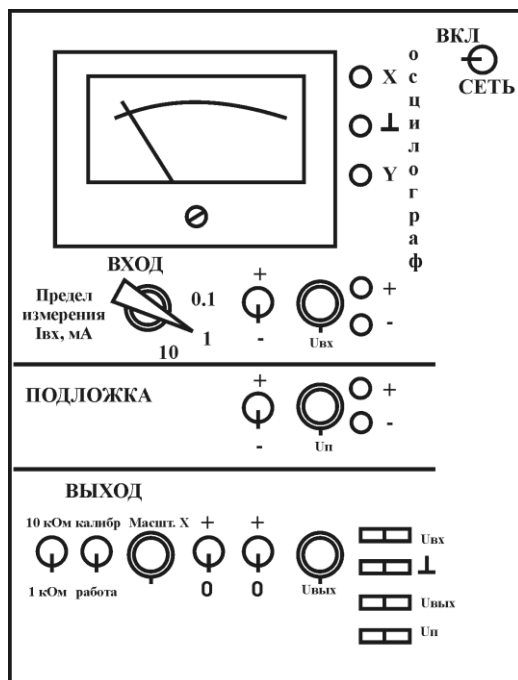


Рис. П.3. Лицевая панель характериографа

Стрелочная головка показывает постоянный ток на входе исследуемого четырехполосника. Верхний ряд ручек (ВХОД) относится к входной части прибора: переключатель слева позволяет выбрать предел измерения входного тока в миллиамперах. Тумблером “+/-” задается полярность, а ручкой “ $U_{вх}$ ” – амплитуда входного напряжения. С клемм справа можно измерить напряжение внешним вольтметром.

Средний ряд ручек (ПОДЛОЖКА) предназначен для подачи независимого смещения на подложку МДП-транзистора. Слева направо: тумблер выбора полярности напряжения, ручка управления величиной напряжения и пара клемм для его измерения. Этот источник может быть использован и для других целей в качестве дополнительного автономного источника постоянного напряжения.

Нижний ряд ручек (ВЫХОД) относится к выходу исследуемого прибора. Выходной ток прибора $I_{вых}$ пропускается через нагрузочный резистор R_n величиной 1 или 10 кОм (тумблер НАГРУЗКА), а падение напряжения на этом резисторе выдается на клемму “У” осциллографа. Ток через прибор можно получить, отсчитав напряжение по вертикальной оси с экрана осциллографа и разделив его на величину R_n . Ввиду того, что в целях повышения точности измерения между выходным сопротивлением измеряемого прибора $R_{вых}$ и сопротивлением нагрузки должно быть обеспечено условие $R_{вых} \gg R_n$, следует выбирать предел $R_n = 1$ кОм, если только выбор нужных пределов измерения осциллографа позволяет наблюдать требуемые кривые на его экране.

Тумблер КАЛИБРОВКА – РАБОТА вместе с ручкой МАСШТАБ позволяет установить масштаб напряжений по оси X осциллографа. Двумя тумблерами правее выбирается правая или левая полуось на оси напряжений либо вся ось напряжений, а ручкой “ $U_{вых}$ ” регулируется величина выходного напряжения. В характернографе использована сетевая частота развертки выходного напряжения – 50 Гц.

Для выбора масштаба напряжения по оси X надо перенести тумблер КАЛИБРОВКА – РАБОТА в положение КАЛИБРОВКА. При этом в качестве измеряемого прибора будет выбран эталонный стабилитрон, находящийся внутри характернографа. Затем следует выбрать всю ось напряжений, включив оба тумблера “0/–”, “0/+” в нижнем ряду, и ручкой $U_{вых}$ медленно повышать выходное напряжение на эталонном стабилитроне до появления на ВАХ двух вертикальных участков.

Напряжение между этими участками равно 10 В. Во избежание порчи эталонного стабилитрона не следует пропускать через него большой ток, то есть не следует делать вертикальные участки слишком протяженными. Далее ручкой МАСШТАБ выбрать требуемый масштаб по оси X, снять выходное напряжение и переключить тумблер КАЛИБРОВКА – РАБОТА в положение РАБОТА. При этом характериограф переключится с внутреннего стабилитрона к испытываемому прибору. Выбрав нужные полярности напряжений, можно теперь исследовать прибор, однако ручку МАСШТАБ трогать уже не следует.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Свистова Т.В. Вакуумная и плазменная электроника: учеб. пособие / Т.В. Свистова. Воронеж: ВГТУ, 2005. Ч. 1. 178 с.
2. Свистова Т.В. Вакуумная и плазменная электроника: учеб. пособие / Т.В. Свистова. Воронеж: ВГТУ, 2005. Ч. 2. 103 с.
3. Свистова Т.В. Приборы твердотельной электроники: учеб. пособие / Т.В. Свистова. Воронеж: ВГТУ, 2012. 294 с.
4. Свистова Т.В. Твердотельная электроника: учеб. пособие / Т.В. Свистова. Воронеж: ВГТУ, 2006. Ч. 1. 193 с.
5. Свистова Т.В. Твердотельная электроника: учеб. пособие / Т.В. Свистова. Воронеж: ВГТУ, 2006. Ч. 2. 173 с.
6. Сушков А.Д. Вакуумная электроника: Физико-технические основы: учеб. пособие / А.Д. Сушков СПб: Лань, 2004. 464 с.
7. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы: учебник для вузов / В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин. СПб.: Лань, 2003. 480 с.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ № 1 - 2 по дисциплине
«Физические основы электроники»
для студентов направления подготовки бакалавров
210100 «Электроника и микроэлектроника»,
профиля «Микроэлектроника и твердотельная электроника»
заочной формы обучения

Составитель
Свистова Тамара Витальевна

В авторской редакции

Подписано к изданию 21.05.2013
Объем данных 3,8 Мб.

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