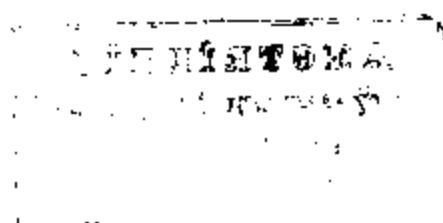


Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Кафедра электроники

Лабораторный практикум
по курсу
ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ
для студентов всех специальностей БГУИР
В 2-х частях

Часть 1
Активные компоненты полупроводниковой электроники



Минск 1999

СОДЕРЖАНИЕ

Общие методические указания	3
Лабораторная работа № 1.	
Исследование полупроводниковых диодов	4
Лабораторная работа № 2.	
Исследование биполярных транзисторов	16
Лабораторная работа № 3.	
Исследование полевых транзисторов	26
Лабораторная работа № 4.	
Исследование оптоэлектронных приборов	35

УДК 621.382

ББК 32.852

Л12

Бельский А.Я., Березовский В.К., Валенко В.С., Дробот С.В., Дунаева Г.П., Мельников В.А., Путилин В.Н., Русакович В.Н., Ткаченко Ф.А., Хандогин М.С. Лабораторный практикум по курсу "Электронные приборы" для студентов всех специальностей БГУИР. В 2 ч. Ч 1. Активные компоненты полупроводниковой электроники. – Мн.: БГУИР, 1999. – 51 с.

Лабораторный практикум по курсу "Электронные приборы" включает 13 лабораторных работ, выполняемых студентами в соответствии с учебными планами и программами специальностей БГУИР. Материал по каждой работе содержит цель, краткие теоретические сведения, методические указания и порядок выполнения работы.

В первую часть настоящего практикума вошли лабораторные работы по исследованию приборов полупроводниковой электроники. Вторая часть включает работы по исследованию аналоговых и импульсных устройств.

Предназначен для студентов всех специальностей БГУИР.

Лабораторные занятия по курсу "Электронные приборы" проводятся фронтальным методом. На первом занятии студент должен пройти инструктаж по технике безопасности, ознакомиться с лабораторным стендом и правилами выполнения лабораторных работ.

При подготовке к лабораторной работе необходимо:

изучить материал по рекомендуемой литературе,
выполнить необходимые предварительные расчеты.

Исследования проводятся на универсальных лабораторных стендах, содержащих необходимые измерительные приборы и источники питания. При подключении измерительных приборов, расположенных на вертикальной панели стенда, необходимо обращать внимание на полярность приборов и соответствие выбранного предела измерений ожидаемому значению измеряемой величины.

Сборка схемы производится при выключенных источниках питания. Напряжение питания включается только после проверки ее лаборантом или преподавателем. Перед включением блока питания ручки всех регулировочных потенциометров должны быть повернуты против часовой стрелки до упора.

Описания дополнительной радиоизмерительной аппаратуры (электронные осциллографы, генераторы, вольтметры и пр.), используемой в работах, имеются на каждом рабочем месте в виде инструкций.

Схемы исследуемых устройств, измерительных установок и графики экспериментальных характеристик выполняются в соответствии с требованиями ЕСКД.

По каждой выполненной лабораторной работе студент должен составить отчет и представить его преподавателю к защите на следующем занятии в лаборатории.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

Цель работы

1. Изучить устройство, принцип действия, систему обозначений, параметры и характеристики полупроводниковых диодов, области их применения.
2. Экспериментально исследовать вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодов, указанных в карточке задания, и рассчитать по измеренным характеристикам их требуемые параметры.

Краткие теоретические сведения

Полупроводниковым диодом называют электропреобразовательный прибор с одним (или несколькими) выпрямляющим электрическим переходом и двумя омическими выводами для подключения к внешней цепи. Принцип работы большинства диодов основан на использовании физических явлений в р-п-переходе.

Диоды классифицируются: по материалу (германиевые, кремниевые, арсенид-галлиевые); структуре перехода (точечные, плоскостные); назначению (выпрямительные, импульсные, стабилитроны и т.д.); диапазону частот (низко- и высокочастотные); виду вольт-амперной характеристики и т.д.

В зависимости от технологических процессов, используемых при изготовлении диодов, различают: сплавные, диффузионные, планарно-эпитаксиальные диоды и их разновидности. Устройство полупроводникового диода, изготовленного по

планарно-эпитаксиальной технологии, приведено на рис. 1.

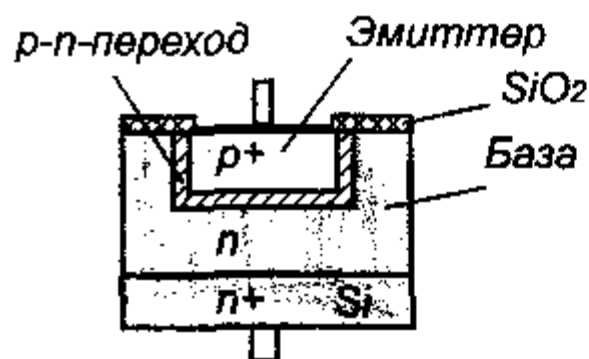


Рис. 1

Большинство полупроводниковых диодов выполняют на основе несимметричных р-п-переходов. В качестве структурных элементов диодов используют также р-і-, п-і-переходы, переходы металл-полупроводник, p^+-p -, p^+-n -переходы, гетеропереходы. Изготавливаются также диоды с р-і-п-, p^+-p -п- и n^+-p -п-структурами.

Вся структура с электрическим переходом заключается в металлический, стеклянный, керамический или пластмассовый корпус для исключения влияния окружающей среды. Полупроводниковые диоды изготавливаются как в дискретном, так и в интегральном исполнении.

Система обозначений полупроводниковых диодов

Для маркировки полупроводниковых диодов используется буквенно-цифровая система условных обозначений согласно ОСТ 11.336.919-81.

Первый элемент — буква или цифра, характеризует используемый материал: Г(1) — германий (Ge); К(2) — кремний (Si); А(3) — галлий (Ga) и его соединения; И(4) — индий In и его соединения. Второй элемент — буква, характеризует тип диода: Д — выпрямительный; В — варикап; И — туннельный и обращенный; С — стабилитрон и стабистор; Л — излучающий светодиод. Третий элемент — цифра, характеризует назначение диода. Например, для диодов группы Д: 1 — выпрямительные маломощные (ток до 300 мкА); 2 — выпрямительные средней мощности (ток до 10 А); 3 — диоды большой мощности (ток свыше 10 А); 4–9 — диоды импульсные с различным временем восстановления. Четвертый элемент (2–3 цифры) — номер разработки (для стабилитрона — напряжение стабилизации в десятых долях вольта). Пятый элемент — буква, характеризует вариант по параметрам.

Графические обозначения полупроводниковых диодов на электрических принципиальных схемах представлены на рис. 2.

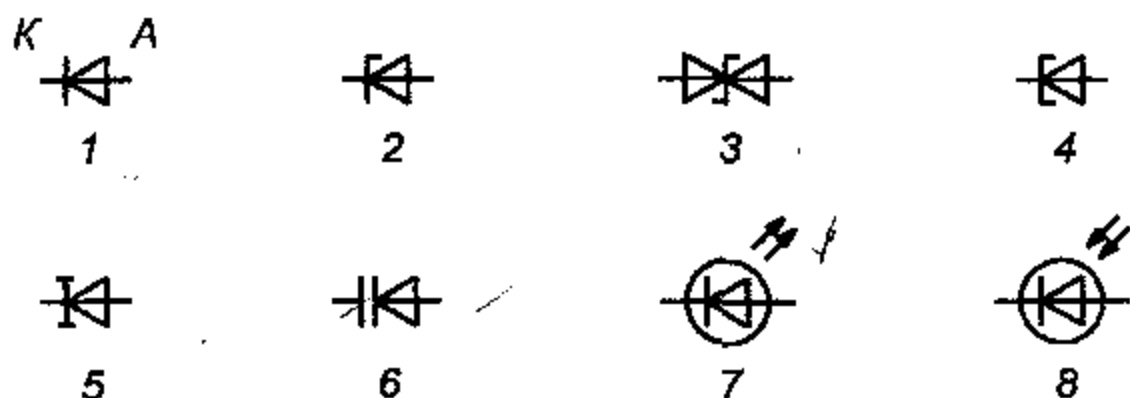


Рис. 2. Графические обозначения полупроводниковых диодов. 1 — общее обозначение (выпрямительный, импульсный, высокочастотный диод); 2 — стабилитрон; 3 — двуханодный стабилитрон; 4 — туннельный диод; 5 — обращенный диод; 6 — варикап; 7 — светодиод; 8 — фотодиод

Вольт-амперная характеристика, пробой и общие параметры диодов

Если к выводам диода подключен источник внешнего напряжения плюсом к аноду, а минусом к катоду, то диод будет включен в прямом направлении, и через него будет протекать значительный инжекционный ток, называемый прямым током. При изменении полярности внешнего напряжения на выводах диода на обратную (плюс на катоде, минус на аноде) он будет

+ К — А —

включен в обратном направлении. В этом случае через диод протекает незначительный по величине ток, называемый обратным током, обусловленный экстракцией неосновных носителей заряда через электрический переход.

Зависимость тока, протекающего через диод, от величины и полярности приложенного к его выводам внешнего напряжения называется вольт-амперной характеристикой диода:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right), \quad (1)$$

где $U_T = kT/q$ – температурный потенциал, равный 26 мВ при $T=300$ К; I_0 – обратный ток насыщения. Уравнение (1) называют теоретической или идеализированной ВАХ диода. В нем не учтено суммарное сопротивление базы, омических контактов и выводов диода r_d . С учетом этого сопротивления реальная ВАХ диода имеет вид

$$I = I_0 \left(e^{\frac{q(U - r_d I)}{kT}} - 1 \right). \quad (2)$$

На рис. 3 пунктиром изображена теоретическая ВАХ, а сплошной линией – реальная ВАХ. Из-за существенного различия значений прямого и обратного токов и напряжений прямые и обратные ветви ВАХ имеют различный масштаб. Прямая ветвь ВАХ, как следует из (2), сдвинута в сторону больших прямых напряжений при $I_{пр} = \text{const}$. Различие между теоретической и реальной ВАХ в области обратных напряжений обусловлено неучтенной в (1) и (2) генерацией носителей заряда в переходе. Поэтому $I_{обр}$ не остается постоянным, а медленно возрастает с ростом $U_{обр}$. Более того, при достижении некоторого критического значения $U_{обр}$ ток $I_{обр}$ начинает резко расти при почти неизменном обратном напряжении. Это явление называется пробоем перехода диода (рис. 3, кривая а).

Различают два вида пробоя: электрический пробой и тепловой. В свою очередь электрический пробой делится на лавинный и туннельный. Лавинный пробой характерен для широких переходов. Если длина свободного пробега носителей заряда меньше ширины перехода, то при достаточно больших значениях $U_{обр}$ (от 7 до 400 В) носители заряда приобретают кинетическую энергию, достаточную для развития лавинообразного процесса ионизации атомов полупроводника, что и вызывает резкий рост тока при почти неизменном $U_{обр}$.

Туннельный пробой развивается в узких переходах при сильном электрическом поле за счет туннельного проникновения через тонкий потенци-

альный барьер электронов из валентной зоны одной области в зону проводимости другой без изменения энергии.

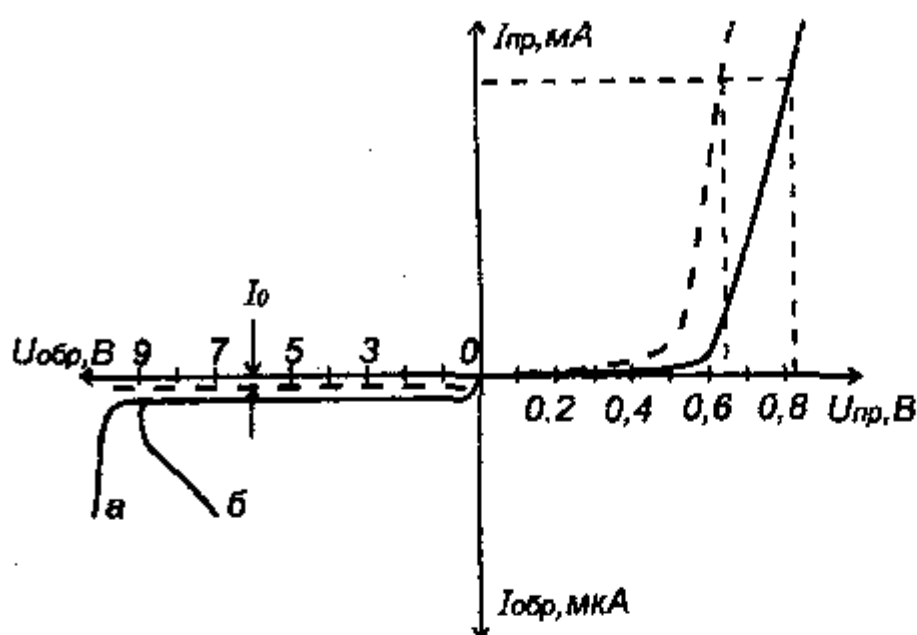


Рис. 3

Тепловой пробой возникает вследствие перегрева электрического перехода протекающим через него током при недостаточном теплоотводе. За счет термогенерации носителей в переходе резко возрастает ток, что ведет к еще большему разогреву перехода. Если температура перехода превысит

допустимое значение, структура перехода претерпевает необратимые изменения, и диод выходит из строя. На участке теплового пробоя (рис. 3, кривая б) $U_{обр}$ уменьшается при возрастании $I_{обр}$. При достаточно больших прямых токах $I_{пр}$ также может развиваться тепловой пробой, если не ограничить $I_{пр}$.

Величину $K_v = I_{пр} / I_{обр} = e^{U_{пр} / U_T} \gg 1$ называют коэффициентом выпрямления (характеризует односторонний характер проводимости диода, т.к. $I_{пр} \gg I_{обр}$).

На ВАХ диода существенно влияет температура окружающей среды (рис. 4). С ростом температуры ток I_0 возрастает по экспоненциальному закону $e^{-\frac{\Delta W}{kT}}$, где ΔW – ширина запрещенной зоны материала полупроводника. В инженерных расчетах полагают, что ток I_0 удваивается на каждые 10°C в германиевых диодах, а в кремниевых на каждые 7°C .

Температурные изменения прямого падения напряжения на диоде оценивают температурным коэффициентом напряжения $TKH = -\frac{\Delta U_{пр}}{\Delta T}$ при $I_{пр} \approx \text{const}$. В расчетах его принимают равным $-2 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$.

Все диоды характеризуются общими параметрами, к которым относятся:

рабочий диапазон температур;

допустимый прямой ток $I_{пр \text{ макс}}$, при котором температура перехода достигает $T_{\text{макс}}$;

допустимое обратное напряжение $U_{обр\ макс}$, при котором не происходит пробоя p-n-перехода,

обычно $U_{обр\ макс} \leq 0,8U_{пр}$; допустимая мощность, рассеиваемая на диоде

$$P_{д\ макс} = \frac{T_{п\ макс} - T_{ср}}{R_T}, \text{ где}$$

R_T — тепловое сопротивление перехода, характеризующее условия теплоотвода, обычно R_T определяется экспериментально и приводится в справочниках;

прямое и обратное

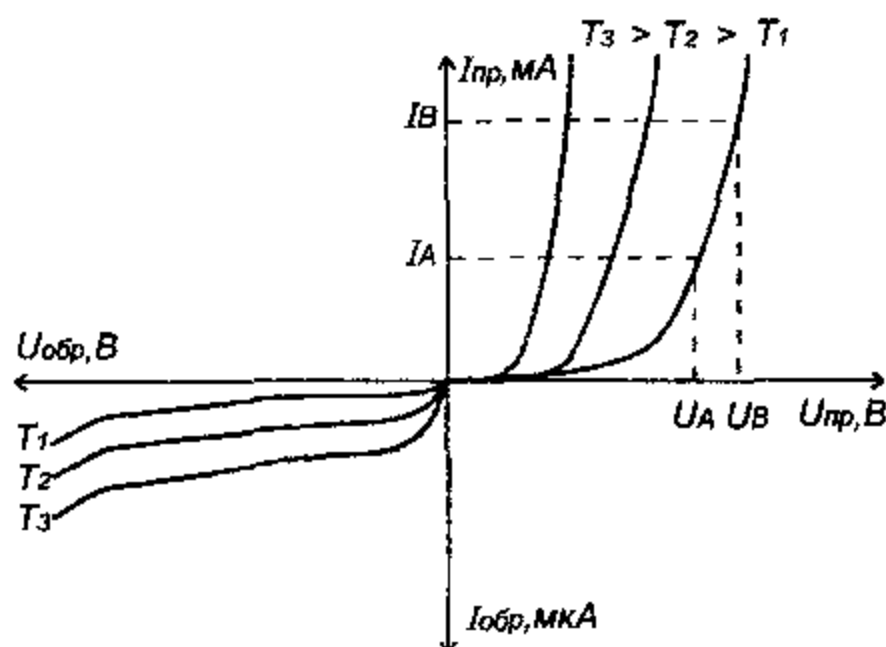


Рис. 4

сопротивления диода постоянному току

$$R_{пр} = \frac{U_{пр}}{I_{пр}}; \quad R_{обр} = \frac{U_{обр}}{I_{обр}};$$

прямое и обратное дифференциальные сопротивления (сопротивления переменному току)

$$r_{диф\ пр} = \frac{\Delta U_{пр}}{\Delta I_{пр}}; \quad r_{диф\ обр} = \frac{\Delta U_{обр}}{\Delta I_{обр}}.$$

Кроме общих параметров некоторые виды диодов характеризуются специальными параметрами, присущими только этим диодам.

Выпрямительные диоды

Предназначены для преобразования переменного тока с частотой от 50 до 20000 Гц в пульсирующий ток одного направления и широко используются в источниках питания радиоэлектронной аппаратуры различного назначения. В качестве полупроводникового материала для таких диодов используют кремний, реже германий и арсенид галлия. Принцип работы выпрямительных диодов основан на вентильном свойстве p-n-перехода. Делятся на диоды малой, средней и большой мощности. Диоды малой мощности предназначены для выпрямления токов до 300 мА, средней и большой мощности — для выпрямления токов соответственно от 300 мА до 10 А и от 10 до 1000 А. Преимущества кремниевых диодов: малые обратные токи;

возможность использования при более высоких температурах окружающей среды и больших значениях обратных напряжений. Преимущество германиевых диодов – малое падение напряжения $0,3 \dots 0,6$ В при протекании прямого тока (по сравнению с $0,8 \dots 1,2$ В у кремниевых).

В качестве выпрямительных диодов используют плоскостные, сплавные, диффузионные и эпитаксиальные диоды, выполненные на основе несимметричных р-п-переходов. Барьерная емкость перехода из-за большой площади велика и ее значение достигает десятков пикофарад. Германиевые диоды могут быть использованы при температурах не более $70 \dots 80$ °С, кремниевые – до $120 \dots 150$ °С, арсенид-галлиевые – до 150 °С.

Максимальное обратное напряжение маломощных низкочастотных выпрямительных диодов лежит в пределах от нескольких десятков до 1200 В. На более высокие напряжения промышленностью выпускаются выпрямительные столбы, использующие последовательное соединение диодов. Обратные токи не превышают 300 мкА для германиевых диодов и 10 мкА для кремниевых.

Мощные (силовые) диоды различаются по частотным свойствам и работают на частотах в диапазоне от десятков герц до десятков килогерц и изготавливаются преимущественно из кремния.

Работа при больших токах и высоких обратных напряжениях связана с выделением значительной мощности в р-п-переходе. Поэтому в установках с диодами средней и большой мощности используются охладители – радиаторы с воздушным и жидкостным охлаждением. При воздушном охлаждении тепло отводится с помощью радиатора. При этом охлаждение может быть естественным (за счет конвекции воздуха) или принудительным (с использованием обдува корпуса прибора и радиатора с помощью вентилятора). При жидкостном охлаждении в радиатор по специальным каналам пропускается теплоотводящая жидкость (вода, антифриз, трансформаторное масло, синтетические диэлектрические жидкости).

К основным параметрам выпрямительных диодов относятся:

максимально допустимый прямой ток $I_{пр макс}$;

прямое падение напряжения на диоде $U_{пр}$ (при $I_{пр макс}$);

максимально допустимое обратное напряжение $U_{обр макс}$;

обратный ток при заданном обратном напряжении $I_{обр}$ (при $U_{обр макс}$);

диапазон рабочих температур окружающей среды;

коэффициент выпрямления K_n ;

предельная частота выпрямления, соответствующая уменьшению коэффициента выпрямления в 2 раза.

Предназначены для выпрямления электрических сигналов высокой частоты. Обозначаются и маркируются так же, как и выпрямительные низкой частоты. Используются в радиоприемной, телевизионной и другой аппаратуре (в детекторах и демодуляторах). Требование по величине $U_{обр\ макс}$ и $I_{пр\ макс}$ значительно ниже, чем в выпрямительных низкочастотных. Для высокочастотных диодов стремятся получить минимальное значение собственной емкости, поскольку на достаточно высоких частотах реактивное сопротивление этой емкости становится соизмеримыми с обратным сопротивлением р-п-перехода диода, т.е. эффект выпрямления (детектирования) резко снижается. Для уменьшения площади р-п-перехода, а следовательно, и его емкости используют точечную конструкцию диода. Барьерная емкость точечных диодов не превышает 1 пФ, а рабочая частота составляет 150 МГц и более.

Емкость диода складывается из емкости корпуса и емкости р-п-перехода ($C_d = C_k + C_{п}$). Уменьшение емкости корпуса C_k достигается применением корпусов специальной конструкции. С этой же целью высокочастотные диоды часто выполняются вообще без корпуса, т.е. применяется бескорпусная конструкция.

Прямая ветвь ВАХ точечного диода практически не отличается от реальной ВАХ р-п-перехода, а обратная ветвь не имеет участка насыщения, что объясняется процессами генерации носителей заряда в неоднородном поле точечного контакта, вызванной лавинным умножением.

Высокочастотные диоды характеризуются в основном теми же параметрами, что и выпрямительные.

Импульсные диоды

Предназначены для работы в цифровых и других устройствах импульсной техники. Обозначаются так же, как и выпрямительные, имеют малую длительность переходных процессов. От выпрямительных диодов отличаются малыми емкостями р-п-перехода (доли пикофарад) и рядом параметров, определяющих переходные характеристики диода. Уменьшение емкостей достигается за счет уменьшения площади р-п-перехода, поэтому допустимые мощности рассеяния у них невелики (30...40 мВт).

На работу импульсных диодов влияют эффекты накопления и рассасывания носителей заряда. При воздействии на диод коротких по времени импульсов начинает сказываться инерционность процессов рассасывания носителей и перезаряда его емкости. Время установления сопротивления пря-

мовключенного р-п-перехода диода $t_{уст}$ определяется инжекцией носителей заряда, их диффузионным перемещением в глубь базы, которое уменьшает объемное сопротивление базы диода до своего стационарного состояния. После окончания прямоугольного импульса при обратном включении р-п-перехода первоначально резко увеличивается величина обратного тока вследствие интенсивного рассасывания неравновесных носителей с последующим его экспоненциальным уменьшением до стационарного значения теплового тока I_0 в формуле (2).

Время восстановления обратного сопротивления перехода $t_{вос}$ до своего нормального значения определяется по формуле

$$t_{вос} = \frac{W}{v_{др} + v_{рек}},$$

где $v_{др}$ и $v_{рек}$ — скорости дрейфа и рекомбинации носителей в структуре, определяющие скорость рассасывания носителей, W — протяженность структуры диода между его выводами. Скорость дрейфа носителей зависит от напряженности поля, сравнительно невелика и имеет свой предел $v_{нас}$. Для уменьшения $t_{вос}$ необходимо уменьшить объем полупроводниковой структуры и увеличить скорость рекомбинации неосновных носителей, что достигается технологией изготовления импульсных диодов: введением в исходный материал нейтральных примесей, чаще всего золота (Au), для создания так называемых "ловушек" — центров рекомбинации.

Параметры импульсных диодов те же, что и у высокочастотных диодов. Кроме того, к ним добавляются специфические параметры:

общая емкость диода C_d (десятые доли...единицы пикофарад);

максимальное импульсное прямое напряжение $U_{пр макс и}$;

максимально допустимый импульсный ток $I_{пр макс и}$;

время установления прямого напряжения $t_{уст}$ — интервал времени от момента подачи импульса прямого тока на диод до достижения заданного прямого напряжения (доли наносекунд...доли микросекунд);

время обратного восстановления диода $t_{вос}$ — время переключения диода с заданного прямого тока на заданное обратное напряжение от момента прохождения тока через нулевое значение до момента достижения обратным током заданного значения (доли наносекунд ...доли микросекунд).

Для уменьшения $t_{вос}$ применяют специальные разновидности импульсных диодов: диоды с барьером Шотки (ДБШ), диоды с накоплением заряда

(ДНЗ). В ДБШ переход выполнен на основе выпрямляющего контакта металл-полупроводник, в котором работа выхода из металла больше, чем работа выхода из полупроводника. У этих диодов не затрачивается время на накопление и рассасывание зарядов в базе, их быстроедействие зависит только от скорости процесса перезаряда барьерной емкости. Конструктивно ДБШ выполняются в виде пластины низкоомного кремния, на которую нанесена высокоомная эпитаксиальная пленка с электропроводностью того же типа. На поверхность пленки вакуумным напылением нанесен слой металла. Инерционность ДБШ в основном определяется емкостью выпрямляющего контакта, которая может быть меньше 0,01 пФ.

В ДНЗ база изготавливается неравномерно легированной по длине. У таких диодов концентрация примеси в базе при приближении к р-п-переходу уменьшается, поэтому неравномерной оказывается и концентрация основных носителей базы — электронов, если база имеет проводимость n-типа. За счет этого электроны диффундируют в сторону р-п-перехода, оставляя в глубине базы избыточный положительный заряд атомов донорной примеси, а вблизи перехода избыточный заряд электронов. Между этими зарядами возникает электрическое поле, направленное в сторону перехода. Под действием этого поля дырки, инжектированные в базу при прямом включении диода, концентрируются (накапливаются) в базе у границы перехода. При переключении диода с прямого на обратное направление эти дырки под действием поля внутри перехода быстро уходят из базы в эмиттер, и время восстановления обратного сопротивления уменьшается. Для изготовления таких диодов применяются меза- и эпитаксиальная технология.

Стабилитроны

Полупроводниковыми стабилитронами называют диоды, предназначенные для стабилизации уровня напряжения в схеме. Принцип работы стабилитронов основан на использовании электрического вида пробоя р-п-перехода при обратном смещении.

На обратной ветви ВАХ имеется участок со слабой зависимостью напряжения от величины обратного тока (участок с электрическим пробоем р-п-перехода). В качестве стабилитронов используются плоскостные кремниевые диоды. ВАХ стабилитрона изображена на рис. 5. Величина обратного напряжения, при котором начинает развиваться электрический пробой, в значительной степени зависит от удельного сопротивления исходного материала, определяемого концентрацией примеси.

При напряжении менее 6 В в р-п-переходе диода преобладает туннельный пробой. В диапазоне от 6 до 12 В наблюдаются оба вида электрического

пробоя – туннельный и лавинный, а выше 12 В преобладает лавинный пробой. С изменением температуры напряжение стабилизации $U_{ст}$ изменяется. Низковольтные и высоковольтные стабилитроны имеют противоположные изменения напряжения стабилизации при увеличении температуры. При туннельном пробое с ростом температуры $U_{ст}$ уменьшается, а при лавинном – возрастает. Для напряжений от 6 до 12 В влияние температуры незначительно, т.к. в переходе существуют оба вида пробоя.

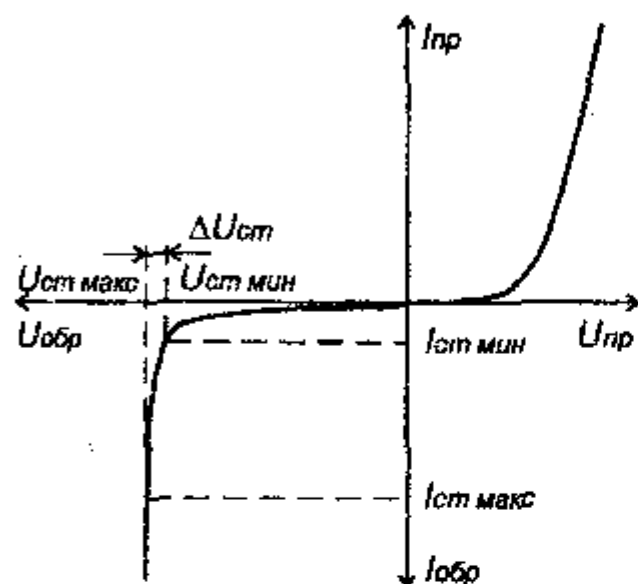


Рис. 5

Основными параметрами стабилитрона являются:

напряжение стабилизации $U_{ст}$ – падение напряжения на стабилитроне при протекании заданного тока стабилизации;

минимальный $I_{ст мин}$ и максимальный $I_{ст макс}$ токи стабилитрона;

температурный коэффициент напряжения стабилизации

$$TKH = \frac{\Delta U_{ст}}{U_{ст} \Delta T} 100 \%;$$

дифференциальное сопротивление стабилитрона $r_{ст} = \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}}$, определяемое на участке пробоя;

$$\text{статическое сопротивление } R_0 = \frac{U_{ст ном}}{I_{ст ном}}.$$

Полупроводниковые диоды, применяемые для стабилизации напряжений менее 1 В с использованием прямой ветви ВАХ, называют стабисторами. Для изготовления стабисторов используется кремний с высокой концентрацией примеси либо селен.

Варикапы

В варикапах используется зависимость барьерной емкости р-п-перехода от обратного напряжения. Они делятся на подстроечные, или варикапы, и умножительные, или варакторы. Варикапы используются для изменения резонансной частоты колебательных систем. Варакторы применяются для умножения частоты.

Основными специальными параметрами варикапов являются:

номинальная емкость C_B , измеренная при заданном обратном напряжении $U_{обр}$;

коэффициент перекрытия по емкости $K_C = \frac{C_{B \text{ макс}}}{C_{B \text{ мин}}}$ — отношение емкостей варикапа при двух заданных значениях обратного напряжения;

сопротивление потерь r_n — суммарное активное сопротивление, включающее сопротивление кристалла, контактных соединений и выводов;

добротность $Q_B = \frac{X_C}{r_n}$ — отношение реактивного сопротивления варикапа на заданной частоте переменного сигнала к сопротивлению потерь;

температурный коэффициент емкости $\alpha_C = \frac{\Delta C}{C \Delta T} \left(\frac{\%}{^\circ C} \right)$ — отношение относительного изменения емкости к вызывавшему его абсолютному изменению температуры окружающей среды.

Кроме рассмотренных диодов выпускаются туннельные диоды, диоды Ганна, лавинно-пролетные диоды, успешно работающие в диапазоне сверхвысоких частот (0,3...300 ГГц), а также фото- и излучательные диоды, используемые в фотоэлектрических и оптоэлектронных приборах и в качестве светоиндикаторных устройств.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь с электрическими параметрами диодов, приведенных в карточке задания, и определите области безопасных режимов работы исследуемых диодов.

Внимание!!! Для предотвращения электрического повреждения диодов измерения проводить только в области дозволенных режимов ра-

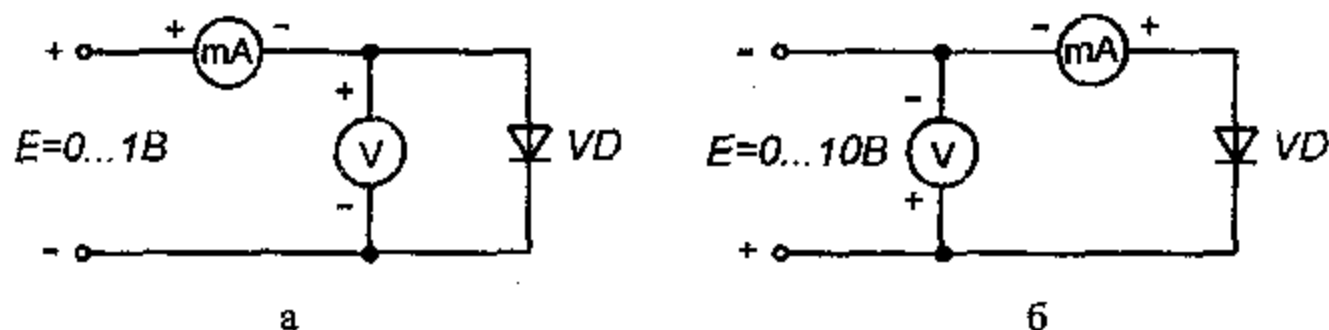


Рис. 6

боты, не выходя за ее границы.

2. Соберите схему (рис. 6,а) и исследуйте прямые ветви ВАХ диодов, указанных в карточке задания.

3. Соберите схему (рис. 6,б) и исследуйте обратные ветви ВАХ диодов, подлежащих изучению.

4. По построенным прямым ветвям ВАХ диодов определите: сопротивление диода постоянному току $R_{пр}$ и дифференциальное сопротивление $r_{диф пр}$ в точке $I_{пр} = 8 \text{ мА}$.

5. Для стабилитронов рассчитайте по измеренным ВАХ статическое R_0 и дифференциальное сопротивление $r_{ст}$.

Содержание отчета

1. Электрические схемы для измерения ВАХ полупроводниковых диодов.
2. Графики ВАХ исследованных диодов.
3. Расчет параметров исследованных диодов.
4. Теоретическая ВАХ диода, рассчитанная по формуле (1) при $I_0 = 0,01 \text{ мкА}$ и $U_T = 0,026 \text{ В}$.

Контрольные вопросы

1. Что называют полупроводниковым диодом?
2. Какие виды электрических переходов используются в полупроводниковых диодах?
3. Чем отличается ВАХ реального диода от идеализированной ВАХ при прямом и обратном включении?
4. Как влияет изменение температуры на ВАХ диода?
5. Какие существуют виды пробоя p-n-перехода и в чем их отличие?
6. Какие физические явления и свойства выпрямляющих электрических переходов используются в выпрямительных и импульсных диодах, в стабилитронах и варикапах?
7. Основные параметры выпрямительных, импульсных диодов, стабилитронов, варикапов.

Литература

1. Электронные приборы / Под ред. Г.Г. Шишкина. – М.: Издательство МАИ, 1996.
2. Батушев В.А. Электронные приборы. – М.: Высш. шк., 1980.
3. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. – М.: Высш. шк., 1991.
4. Ткаченко Ф.А., Хандогин М.С. Учеб. пособие по курсу "Электронные приборы". – Мн.: БГУИР, 1997.
5. Полупроводниковые приборы: Диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы. Справочник / Под общ. ред. Н.Н. Горюнова. – М.: Энергоатомиздат, 1983.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Цель работы

1. Изучить устройство, классификацию, режимы работы, принцип действия и схемы включения биполярных транзисторов р-п-р- и п-р-п-типов.
2. Экспериментально исследовать статические характеристики транзисторов в схемах с общей базой (ОБ) и общим эмиттером (ОЭ) и определить динамические параметры в заданной рабочей точке.

Краткие теоретические сведения

Биполярный транзистор – полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими р-п-переходами и тремя или более выводами, усилительные свойства которого обусловлены явлениями инжекции и экстракции носителей заряда, и пригодный для усиления мощности электрических сигналов.

В зависимости от порядка чередования областей полупроводника, имеющих разную проводимость, различают транзисторы р-п-р- и п-р-п-типа (рис. 1, а, б). Принцип их работы одинаков, различие заключается только в полярности источников внешних напряжений и в направлении протекания токов через электроды.

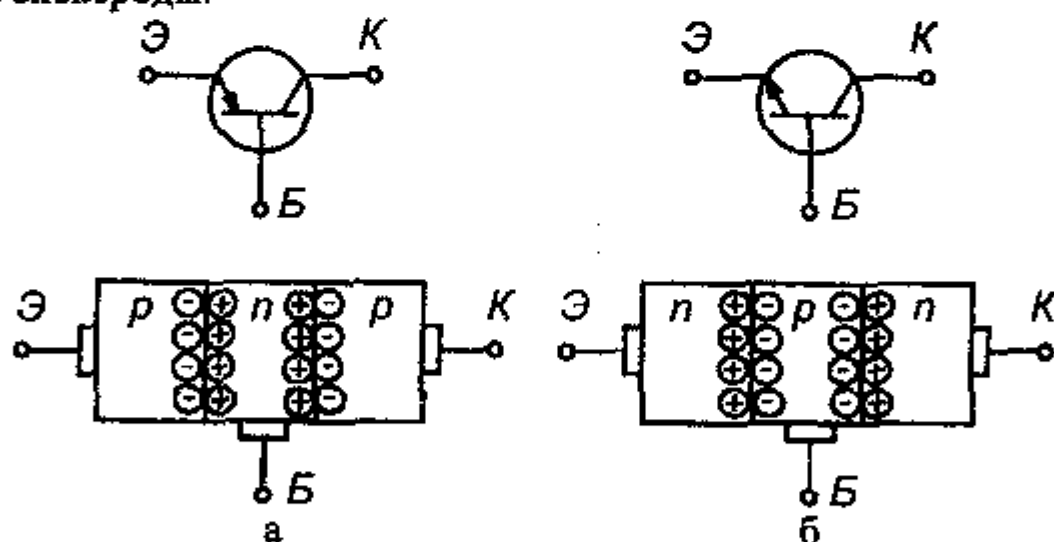


Рис. 1

Классификация и система обозначений биполярных транзисторов

По мощности, рассеиваемой коллекторным переходом, транзисторы бывают: малой мощности $P < 0,3$ Вт; средней мощности $0,3 \text{ Вт} < P < 1,5$ Вт; большой мощности $P > 1,5$ Вт.

По частотному диапазону транзисторы делятся на: низкочастотные $f_{np} < 3$ МГц; среднечастотные $3 \text{ МГц} < f_{np} < 30$ МГц; высокочастотные $30 \text{ МГц} < f_{np} < 300$ МГц; сверхвысокочастотные $f_{np} > 300$ МГц.

Для маркировки биполярных транзисторов используется буквенно-цифровая система условных обозначений согласно ОСТ 11.336.038-77. Обозначение биполярных транзисторов состоит из шести или семи элементов.

Первый элемент – буква или цифра, указывающая исходный материал: Г(1) – германий, К(2) – кремний, А(3) – арсенид галлия.

Второй элемент – буква, указывающая на тип транзистора: Г – биполярный, П – полевой.

Третий элемент – цифра, указывающая на частотные свойства и мощность транзистора (табл. 1)

Таблица 1

Частота	Мощность		
	малая	средняя	большая
Низкая	1	4	7
Средняя	2	5	8
Высокая	3	6	9

Четвертый, пятый, (шестой) элементы – цифры, указывающие порядковый номер разработки.

Шестой (седьмой) элемент – буква, указывающая на разновидность транзистора из данной группы. Примеры обозначения транзисторов: КТ315А; КТ806Б; ГТ108А; КТ3126.

Принцип действия транзистора

Одну из крайних областей транзисторной структуры легируют сильнее, ее используют обычно в режиме инжекции и называют эмиттером. Промежуточную область называют базой, а другую крайнюю область – коллектором. Коллекторная область предназначена для экстракции носителей заряда из базовой области. Электронно-дырочный переход между эмиттерной и базовой областями называют эмиттерным, а между коллекторной и базовой – коллекторным.

Различают следующие режимы работы транзистора:

активный режим – напряжение на эмиттерном переходе прямое, на коллекторном обратное (запирающее);

режим отсечки – на обоих переходах обратное напряжение;

режим насыщения – на обоих переходах прямое напряжение;

инверсный режим – коллекторный переход смещен в прямом направлении, эмиттерный – в обратном.

В зависимости от того, какой из выводов транзистора является общим для входной и выходной цепи, различают три схемы включения транзистора: с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ) и с общим коллектором (ОК). На рис. 2 показаны полярности внешних источников напряжения и направления токов транзистора, соответствующие активному режиму работы, для трех схем включения.

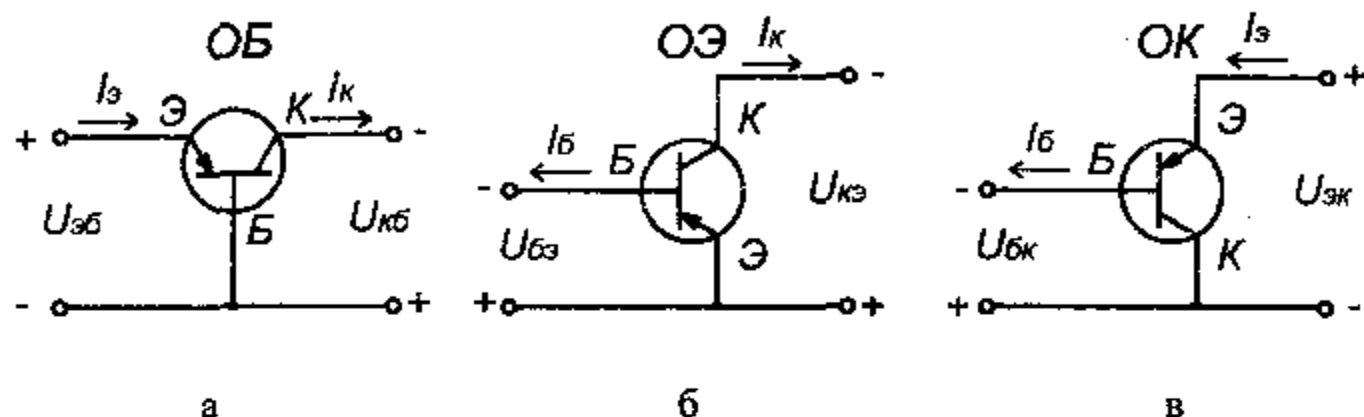


Рис. 2

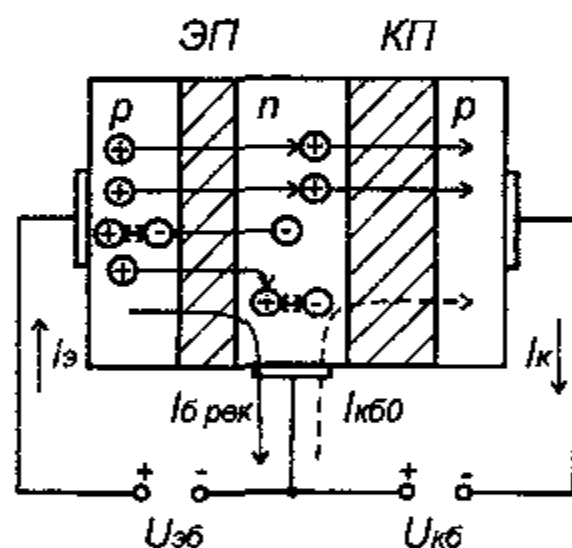


Рис. 3

Принцип работы биполярного транзистора наиболее удобно рассматривать в активном режиме для схемы с общей базой (рис. 3). При увеличении прямого смещения $U_{бэ}$ на эмиттерном переходе снижается его потенциальный барьер, что вызывает инжекцию дырок из эмиттера в базу и электронов из базы в эмиттер. Поскольку концентрация примеси в эмиттере много больше концентрации примеси в базе (концентрация основных носителей эмиттера много больше концентрации основных

носителей базы), то инжекция дырок из эмиттера в базу доминирует над инжекцией электронов из базы в эмиттер. Через эмиттерный переход протекает ток инжекции, имеющий две составляющие: дырочную $I_{эп}$ и электронную $I_{зн}$. Процесс инжекции характеризуется коэффициентом инжекции (эффективностью эмиттерного перехода) $\gamma = I_{эп} / (I_{эп} + I_{зн})$, показывающим, какую долю составляет от общего тока эмиттера ток инжектированных в базу носителей.

В результате инжекции дырок из эмиттера в базу возрастает их концентрация вблизи эмиттерного перехода. Это приводит к диффузионному движению дырок через базу к коллекторному переходу. Поскольку ширина базы зна-

чительно меньше диффузионной длины дырок, то незначительная их часть рекомбинирует с собственными носителями базы – электронами, создавая рекомбинационную составляющую тока базы $I_{б\text{ рек}}$. Процесс переноса неосновных носителей через базу характеризуется коэффициентом переноса $\varepsilon = I_{кр}/I_{эр}$, где $I_{кр}$ – ток дырок, дошедших до коллекторного перехода в области базы.

Дырки, подошедшие к обратносмещенному коллекторному переходу, попадают в ускоряющее поле $U_{кб}$ и экстрагируют в коллектор, создавая управляемую составляющую тока коллектора $I_{к\text{ упр}}$.

Экстракция дырок может сопровождаться ударной ионизацией атомов полупроводника и лавинным умножением носителей заряда в коллекторном переходе. Этот процесс оценивается коэффициентом лавинного умножения $M = I_{к\text{ упр}}/I_{кр}$. В лавинных транзисторах $M > 1$.

Ток коллектора, вызванный инжекцией основных носителей через эмиттерный переход, называют управляемым током коллектора $I_{к\text{ упр}} = \gamma \varepsilon M I_3$, где $\gamma \varepsilon M = h_{21Б} < 1$ называют статическим коэффициентом передачи тока эмиттера. Часто $h_{21Б}$ обозначают как α . Значения $h_{21Б}$ лежат в диапазоне 0,95...0,999.

Кроме управляемого тока коллектора $I_{к\text{ упр}}$ через коллекторный переход протекает обратный неуправляемый ток $I_{кб0}$, обусловленный экстракцией собственных неосновных носителей базы (дырок) и коллектора (электронов):

$$I_k = h_{21Б} I_3 + I_{кб0}. \quad (1)$$

Обратный ток коллекторного перехода $I_{кб0}$ совпадает по направлению с управляемым током коллектора $I_{к\text{ упр}}$, а в цепи базы $I_{кб0}$ противоположен току рекомбинации $I_б = I_{б\text{ рек}} - I_{кб0}$. Величина $I_{кб0}$ для германиевых транзисторов составляет десятки миллиампер, а кремниевых транзисторов – сотни наноампер, причем сильно зависит от температуры,

Из принципа работы видно, что I_3 разветвляется на ток базы $I_б$ и коллекторный ток I_k

$$I_3 = I_б + I_k. \quad (2)$$

Это выражение называют внутренним уравнением транзистора.

Связь между выходным током I_k и входным током $I_б$ транзистора, включенного по схеме с ОЭ, можно получить из (1) и (2):

$$I_k = \frac{h_{21Б}}{1 - h_{21Б}} I_б + \frac{I_{кб0}}{1 - h_{21Б}} = h_{21Э} I_б + (h_{21Э} + 1) I_{кб0} = h_{21Э} I_б + I_{кэ0},$$

где $h_{21Б}/(1-h_{21Б}) = h_{21Э} \gg 1$ — статический коэффициент передачи тока базы (другое обозначение β); $I_{к60}/(1-h_{21Б}) = I_{кЭ0}$ — начальный (сквозной) ток транзистора. Коэффициент $h_{21Э}$ принимает значения десятки...сотни. Поэтому транзистор, включенный по схеме с ОЭ, является хорошим усилителем тока.

Транзистор, включенный по схеме с ОБ, хотя и не усиливает ток ($h_{21Б} < 1$), усиливает входной сигнал по мощности. В активном режиме токи коллектора и эмиттера почти равны, а ток базы равен их разности. Коллекторный ток практически не зависит от напряжения на коллекторном переходе.

Дифференциальное сопротивление коллекторного перехода $r_k = \frac{dU_{к6}}{dI_k}$ очень велико (переход включен в обратном направлении). В цепь коллектора можно включать нагрузку с достаточно большим сопротивлением R_n , практически не изменяя ток коллектора. Дифференциальное сопротивление прямосмещенного эмиттерного перехода $r_э = \frac{dU_{э6}}{dI_э}$ очень мало $r_э \ll r_k$. При

изменении входного (эмиттерного) тока на $\Delta I_э$, практически на такую же величину возрастает коллекторный ток. Однако изменение потребляемой мощности в цепи эмиттера $\Delta P_{вх} = \Delta I_э^2 r_э$ значительно меньше изменения мощности в выходной цепи $\Delta P_{вых} = \Delta I_k^2 R_n \approx \Delta I_э^2 R_n$, т.е. транзистор способен управлять большой мощностью в коллекторной цепи при небольших затратах мощности в эмиттерной цепи.

Статические характеристики биполярных транзисторов

Статические характеристики транзистора отражают зависимость между токами и напряжениями на его входе и выходе. Выбрав в качестве аргумента значения входного тока и выходного напряжения, а функциями значения выходного тока и входного напряжения $I_{вых}, U_{вх} = f(U_{вых}, I_{вх})$, можно получить четыре семейства (входных, выходных, прямой передачи по току и обратной связи по напряжению) характеристик для любой схемы включения транзистора. На рис. 4 и рис. 5 приведены семейства статических характеристик для схем включения с ОБ и ОЭ.

Определение h-параметров по характеристикам

Статические характеристики позволяют определить основные параметры транзистора. Для описания свойств транзистора по переменному току чаще всего используется система h-параметров, которая представляется следующими уравнениями:

$$dU_1 = h_{11}dI_1 + h_{12}dU_2;$$

$$dI_2 = h_{21}dI_1 + h_{22}dU_2.$$

При нахождении h -параметров по статическим характеристикам дифференциалы заменяются конечными приращениями, тогда:

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} \right|_{U_2=\text{const}} \quad \text{-- входное сопротивление;}$$

$$h_{12} = \left. \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} \right|_{I_1=\text{const}} \quad \text{-- коэффициент обратной связи по напряжению;}$$

$$h_{21} = \left. \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1} \right|_{U_2=\text{const}} \quad \text{-- коэффициент передачи по току;}$$

$$h_{22} = \left. \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2} \right|_{I_1=\text{const}} \quad \text{-- выходная проводимость.}$$

Для определения h -параметров воспользуемся семействами входных и выходных характеристик для схемы с ОЭ (рис. 5,а, рис. 5,б). В заданной точке А на линейном участке семейства входных характеристик строим треугольник, проведя прямые параллельно оси абсцисс и ординат до пересечения со следующей характеристикой. Приращения токов и напряжений позволяют определить параметры $h_{11\beta}$ и $h_{12\beta}$:

$$h_{11\beta} = \left. \frac{\Delta U_{6\beta}}{\Delta I_6} \right|_{U_{кз}=\text{const}} = \left. \frac{U_{6\beta}'' - U_{6\beta}'}{I_6'' - I_6'} \right|_{U_{кз}=U_{кз}''},$$

$$h_{12\beta} = \left. \frac{\Delta U_{6\beta}}{\Delta U_{кз}} \right|_{I_6=\text{const}} = \left. \frac{U_{6\beta}'' - U_{6\beta}'}{U_{кз}'' - U_{кз}'} \right|_{I_6=I_6'}.$$

Параметры $h_{21\beta}$, $h_{22\beta}$ определяются по выходным характеристикам. Обратите внимание на различие в обозначении статического коэффициента передачи по току в схеме с ОЭ $h_{21\beta}$ и дифференциального параметра h_{21} . Через точку А', режим которой соответствует точке А, проводим вертикальную прямую до пересечения с соседней характеристикой. Задавая приращения напряжения $U_{кз}$, находим:

$$h_{21\beta} = \left. \frac{\Delta I_k}{\Delta I_6} \right|_{U_{кз}=\text{const}} = \left. \frac{I_k''' - I_k''}{I_6'' - I_6'} \right|_{U_{кз}=U_{кз}''},$$

$$h_{22\beta} = \left. \frac{\Delta I_k}{\Delta U_{кз}} \right|_{I_6=\text{const}} = \left. \frac{I_k' - I_k''}{U_{кз}' - U_{кз}''} \right|_{I_6=I_6'}.$$

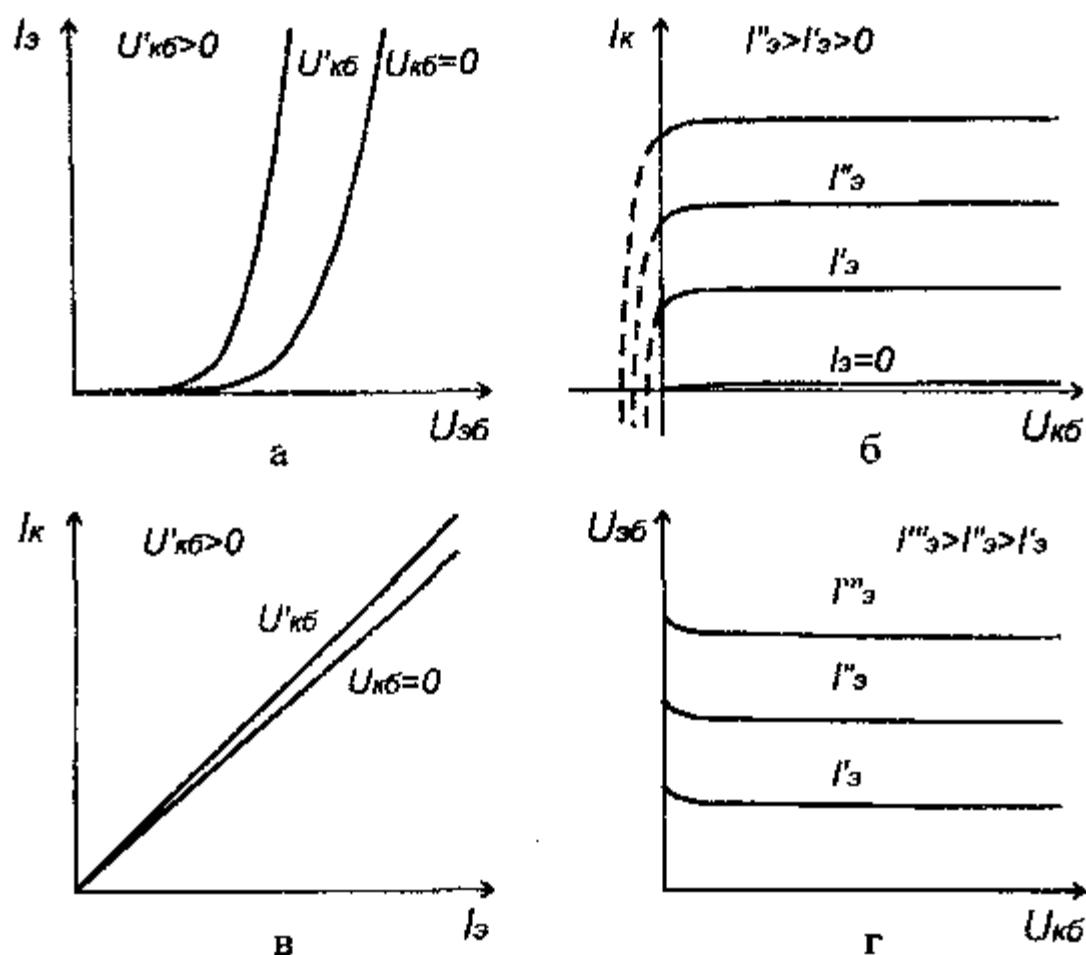


Рис. 4

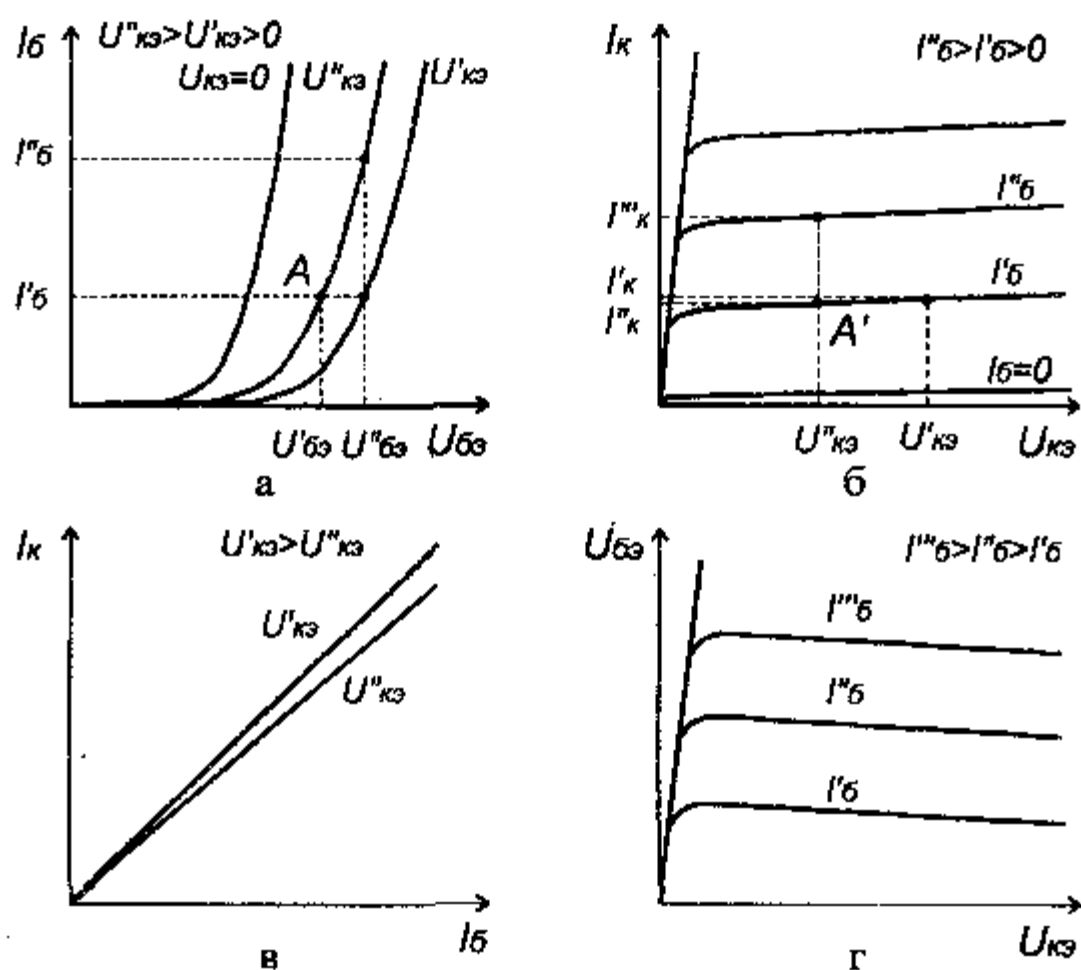


Рис. 5

Аналогично определяются h -параметры для схемы с ОБ.

По вычисленным h -параметрам можно получить параметры Т-образной эквивалентной схемы транзистора, элементы которой достаточно полно отражают свойства реального транзистора на низких частотах, что необходимо для анализа транзисторных схем.

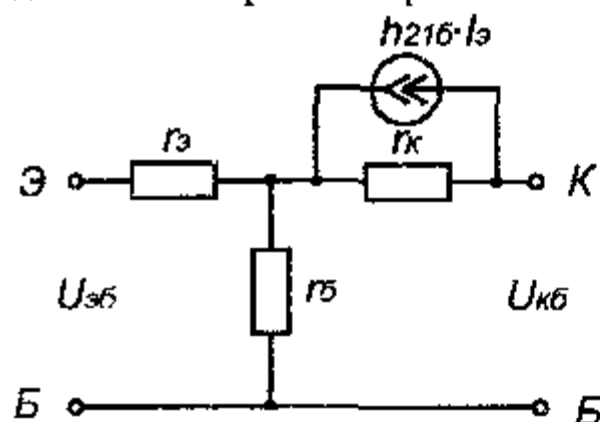


Рис. 6

Эквивалентная Т-образная схема биполярного транзистора, включенного в схему с общей базой, для низких частот представлена на рис. 6, где

$$r_k = \frac{1}{h_{226}}; \quad r_b = \frac{h_{126}}{h_{226}};$$

$$r_3 = h_{116} - (1 + h_{216})r_b.$$

В интегральной схемотехнике в качестве полупроводниковых диодов используются входящие в состав полупроводниковых интегральных микросхем транзисторные структуры в диодном включении (рис. 7).

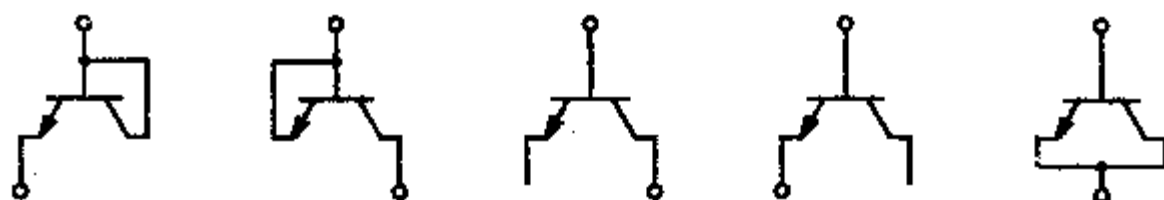


Рис. 7

Порядок выполнения работы

1. Типы исследуемых транзисторов приведены в карточке задания. Используя паспортные данные транзисторов, определить область электрически безопасных режимов работы для каждого исследуемого прибора и нанести границы этой области в системе координат ток-напряжение, как показано на рис. 8.

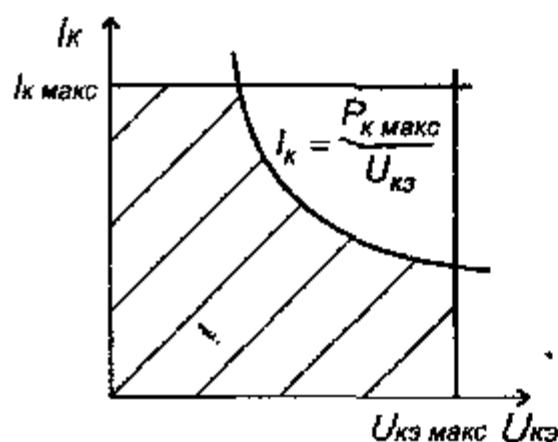


Рис. 8

Внимание!!! Для предотвращения электрического повреждения транзисторов измерения проводить только в области дозволённых режимов работы, не выходя за ее границы.

2. Собрать схему для исследования характеристик транзистора в схеме с ОБ (рис. 9). Обратит внимание на структуру исследуемого транзистора и использовать

вариант (а) для р-п-р-транзисторов и вариант (б) для п-р-п-транзисторов.

2.1. Снять семейство входных характеристик $I_3 = f(U_{36})$ при $U_{к6} = \text{const.}$

2.2. Снять семейство выходных характеристик $I_k = f(U_{к6})$ при $I_3 = \text{const.}$

2.3. Снять семейство характеристик прямой передачи по току $I_k = f(I_3)$

при $U_{к6} = \text{const.}$

2.4. Снять семейство характеристик обратной связи по напряжению

$U_{36} = f(U_{к6})$ при $I_3 = \text{const.}$

2.5. Снять семейство выходных характеристик транзистора в инверсном включении

$I_3 = f(U_{36})$ при $I_k = \text{const.}$

Для обеспечения инверсного включения транзистора достаточно в схеме поменять местами эмиттер и коллектор.

2.6. По полученным данным построить характеристики транзистора и рассчитать h -параметры. Для инверсного включения рассчитать $h_{216и} = \Delta I_3 / \Delta I_k$.

2.7. Рассчитать параметры Т-образной эквивалентной схемы.

3. Собрать схему для исследования характеристик транзистора, включенного по схеме с ОЭ (рис. 10). Для р-п-р-транзистора использовать вариант (а), для п-р-п – вариант (б).

3.1. Снять семейство входных характеристик транзистора $U_{б3} = f(I_6)$ при $U_{к3} = \text{const.}$

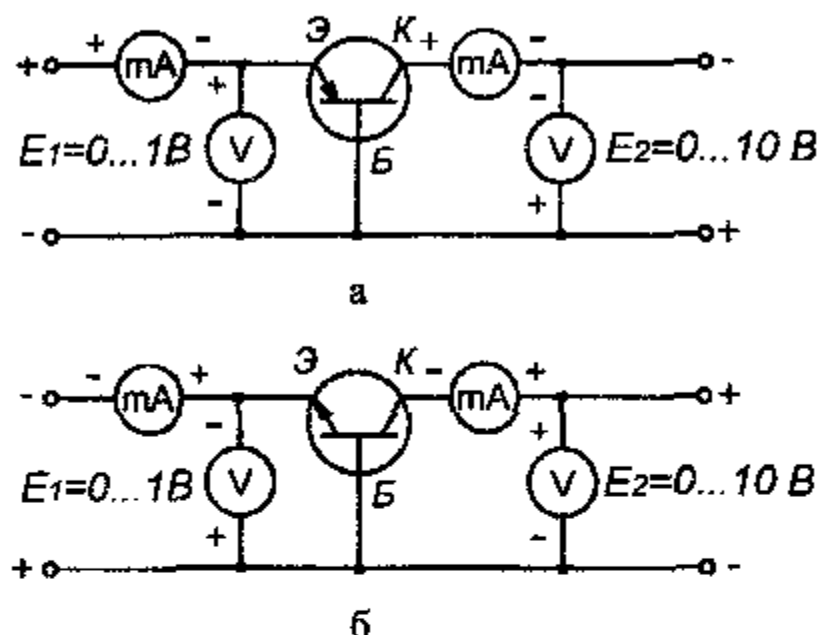


Рис. 9

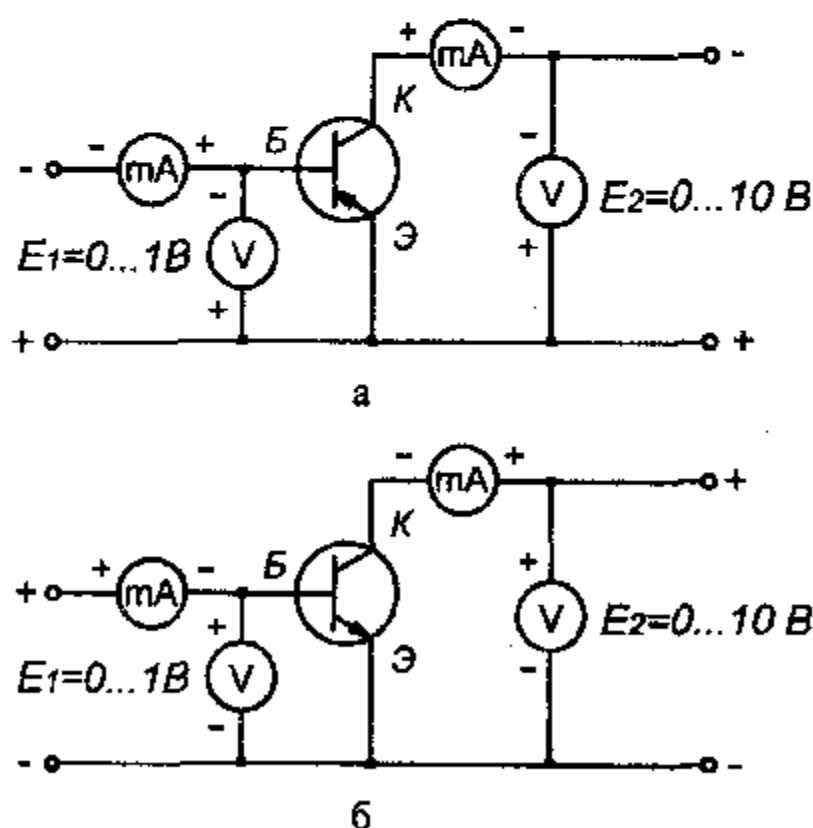


Рис. 10

3.2. Снять семейство выходных характеристик транзистора

$$I_k = f(U_{кэ}) \text{ при } I_б = \text{const.}$$

3.3. Снять семейство характеристик прямой передачи по току

$$I_k = f(I_б) \text{ при } U_{кэ} = \text{const.}$$

3.4. Снять семейство выходных характеристик транзистора в инверсном включении $I_э = f(U_{эк})$ при $I_б = \text{const.}$ Для обеспечения инверсного включения транзистора достаточно в схеме поменять местами эмиттер и коллектор.

3.5. По полученным данным построить характеристики транзистора и рассчитать h -параметры. Для инверсного включения рассчитать $h_{21эи} = \Delta I_э / \Delta I_б$.

Содержание отчета

1. Паспортные данные исследуемого транзистора.
2. Схемы исследования биполярного транзистора.
3. Семейства статических характеристик транзисторов в схемах с ОБ и ОЭ.
4. Расчет h -параметров для схем с ОБ и ОЭ.
5. Расчет параметров Т-образной эквивалентной схемы.

Контрольные вопросы

1. Что такое биполярный транзистор?
2. Почему в биполярном транзисторе происходит усиление электрических колебаний по мощности?
3. Почему транзистор в схеме включения с ОЭ может обеспечить усиление по току, а в схеме с ОБ нет?
4. Что собой представляют входные и выходные характеристики транзистора с ОБ и ОЭ? Как объяснить характер поведения этих характеристик?
5. Перечислить основные режимы работы БТ и указать их на выходных характеристиках в схемах с ОБ и ОЭ.

Литература

1. Электронные приборы / Под ред. Г.Г. Шипкина. – М.: Издательство МАИ, 1996.
2. Батушев В.А. Электронные приборы. – М.: Высш. шк., 1980.
3. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. – М.: Высш. шк., 1991.
4. Ткаченко Ф.А., Хандогин М.С. Учеб. пособие по курсу "Электронные приборы". – Мн.: БГУИР, 1997.
5. Галкин В.И., Булычев А.Л., Лямин П.М. Полупроводниковые приборы: Транзисторы широкого применения: Справочник. – Мн.: Беларусь, 1995.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Цель работы

1. Изучить структуру, принцип действия полевых транзисторов, а также области их применения.
2. Экспериментально исследовать статические характеристики и определить дифференциальные параметры полевых транзисторов.

Краткие теоретические сведения

Полевыми (униполярными) транзисторами называются полупроводниковые приборы, в которых электрический ток создается основными носителями заряда под действием продольного электрического поля, а модуляция тока осуществляется поперечным электрическим полем, создаваемым на управляющем электроде.

Область полупроводника, по которой проходит управляемый ток, называется каналом. Электрод, из которого носители заряда входят в канал, называется истоком, а электрод, через который они уходят из канала, называется стоком. Электрод, используемый для управления величиной поперечного сечения канала, называется затвором. Затвор должен быть электрически изолирован от канала. В зависимости от способа изоляции различают:

транзисторы с управляющим р-п-переходом;

транзисторы с изолированным затвором (МДП-транзисторы).

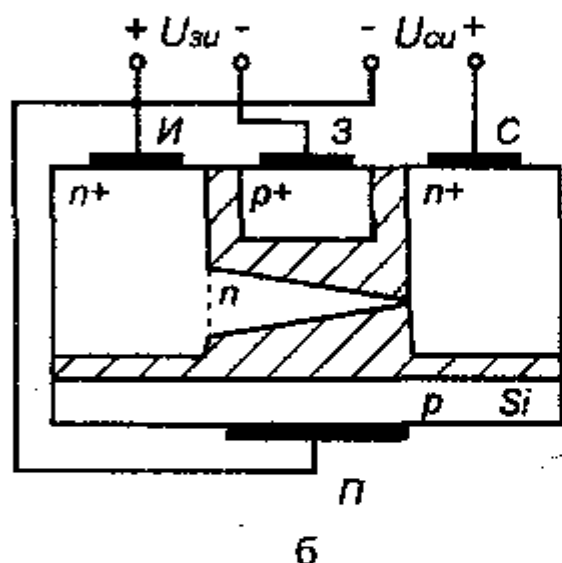
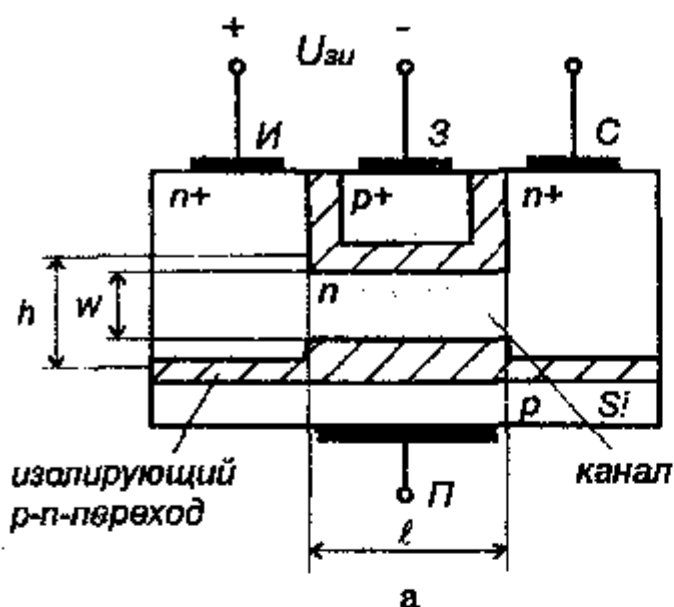
Структура полевого транзистора с управляющим р-п-переходом и каналом n-типа приведена на рис. 1, а. На подложке из р-кремния создается тонкий слой полупроводника n-типа, выполняющий функции канала, т.е. токопроводящей области, сопротивление которой регулируется электрическим полем. С помощью нижнего р-п-перехода осуществляется изоляция канала от подложки и установка начальной толщины канала.

Принцип работы полевого транзистора с управляющим р-п-переходом основан на изменении сопротивления активного слоя (канала) путем расширения р-п-перехода при подаче на него обратного напряжения. Наиболее характерной чертой полевых транзисторов является высокое входное сопротивление, т.к. ток затвора мал, поэтому они управляются напряжением. При $U_{зи} = 0$ сопротивление канала минимально $R_{к0} = \rho l / hw$, где ρ — удельное сопротивление полупроводника; l , w — длина и ширина канала соответственно, h — расстояние между металлургическими границами n-слоя. Чем больше обратное напряжение на затворе $U_{зи}$, тем шире р-п-переходы и тоньше канал.

При некотором напряжении затвора канал полностью перекрывается. Это напряжение называется напряжением отсечки $U_{зи\text{отс}}$.

При подаче на сток положительного напряжения $U_{си}$ (рис. 1,б) в канале возникает ток I_c и вдоль канала появляется падение напряжения U_x , величина которого зависит от расстояния до истока. Это приводит к возникновению напряжения, запирающего р-п-переход между стоком и затвором $U_{сз}$, толщина канала становится переменной.

Поскольку $|U_{сз}| > |U_{зи}|$, то канал сильнее сужается вблизи стока. При некотором напряжении $U_{си} = U_{си\text{нас}}$ канал перекрывается (рис. 1,б). Сопротивление канала при этом $R_{кн} \neq 0$, оно больше начального $R_{к0}$, и под действием напряжения насыщения через канал проходит максимальный ток $I_{с\text{макс}} = U_{си\text{нас}}/R_{кн}$.



И - исток; З - затвор; С - сток; П - подложка

Рис. 1

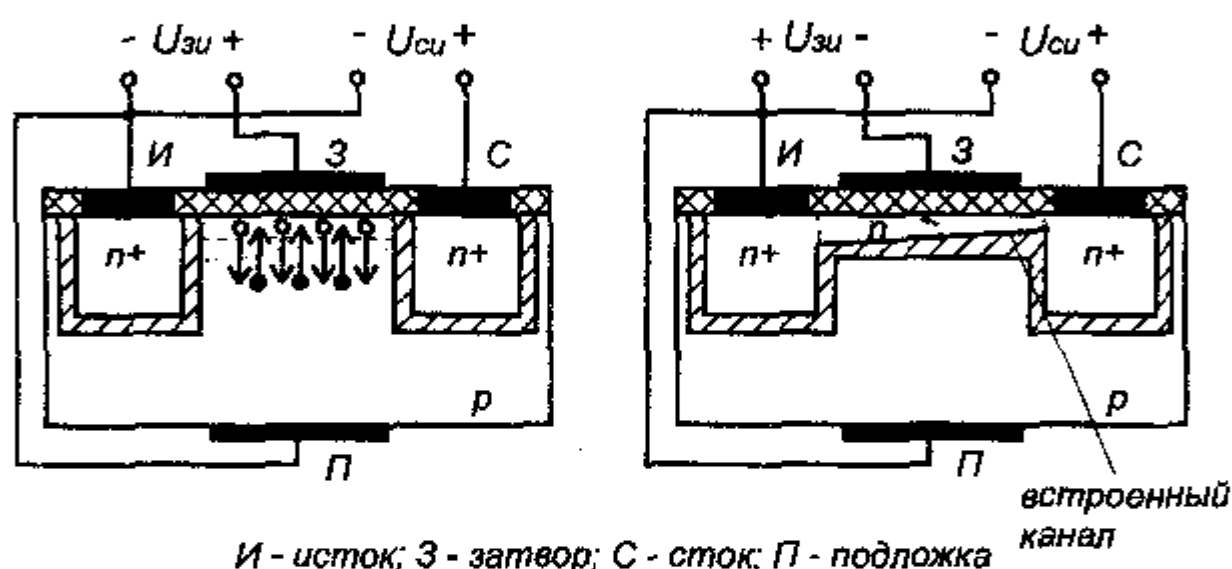
максимальный ток $I_{с\text{макс}} = U_{си\text{нас}}/R_{кн}$.

Транзисторы с изолированным затвором (МДП-транзисторы)

Характерное отличие полевых транзисторов с изолированным затвором состоит в том, что у них между металлическим затвором и областью полупроводника находится слой диэлектрика — двуокись кремния SiO_2 . Поэтому полевые транзисторы с изолированным затвором называются МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) или МОП (металл-окисел-полупроводник). Выпускаются МДП-транзисторы с индуцированным и встроенным каналом.

В основе действия МДП-транзистора лежит эффект поля, представляющий собой изменение величины и типа электропроводности полупровод-

ника вблизи его границы с диэлектриком под действием приложенного напряжения. Если к затвору приложить отрицательное напряжение, то дырки будут притягиваться к диэлектрику SiO_2 и на поверхности полупроводника образуется слой с высокой их концентрацией. Такой режим называется режимом обогащения канала. При подаче на затвор положительного напряжения дырки выталкиваются от поверхности полупроводника и образуется слой с уменьшенной концентрацией дырок. Такой режим называется режимом обеднения. Электроны из полупроводника p -типа будут притягиваться к диэлектрику, и у поверхности полупроводника p -типа образуется слой с электропроводностью n -типа. Таким образом, между истоком и стоком образуется область n^+-n-p типа. Такой режим называется инверсией электропроводности. Изменяя напряжения на затворе, можно изменять сопротивление канала.



И - исток; З - затвор; С - сток; П - подложка

а

б

Рис. 2

В МДП-транзисторе с индуцированным каналом n -типа (рис. 2,а) при напряжении на затворе $U_{зи} = 0$ канал отсутствует и при $U_{си} > 0$ ток стока будет равен нулю. При увеличении положительного напряжения на затворе, начиная с некоторого значения $U_{зи\text{ пор}}$ наступает инверсия электропроводности и происходит образование канала (рис. 2,а). Это напряжение называется пороговым. В справочниках обычно в качестве порогового приводятся значения $U_{зи}$, при которых ток стока $I_c = 10 \text{ мкА}$. При $U_{зи} > U_{зи\text{ пор}}$ в МДП-транзисторах с p -каналом увеличение напряжения на затворе будет приводить к уменьшению сопротивления канала за счет обогащения поверхности канала электронами, ток стока при этом будет увеличиваться. Отсюда видно,

что МДП-транзистор с индуцированным каналом работает только в режиме обогащения.

В МДП-транзисторе со встроенным каналом n -типа (рис. 2,б) уже имеется технологическим путем созданный канал, и при $U_{зи} = 0$ и $U_{си} > 0$ протекает ток стока. При увеличении положительного напряжения на затворе область канала обогащается электронами, и ток стока возрастает. При увеличении отрицательного напряжения на затворе канал обедняется, и ток стока уменьшается. Таким образом МДП-транзисторы со встроенным каналом работают в режимах обогащения и обеднения.

Полевые транзисторы включаются по схемам с общим затвором (ОЗ) (рис. 3,а), общим истоком (ОИ) (рис. 3,б), общим стоком (ОС) (рис. 3,в). Наиболее часто используется схема включения с ОИ.

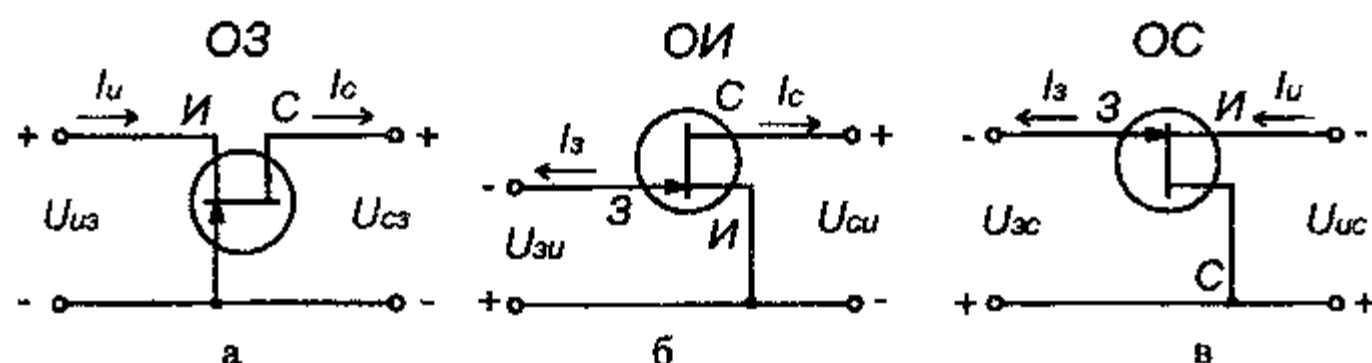


Рис. 3

Статические характеристики полевых транзисторов

Основными характеристиками полевого транзистора являются: выходные (стоковые) — $I_c = f(U_{си})$ при $U_{зи} = \text{const}$ и характеристики передачи (сток-затворные) — $I_c = f(U_{зи})$ при $U_{си} = \text{const}$.

На рис. 4 приведены ВАХ полевых транзисторов, включенных по схеме с ОИ: с управляющим p - n -переходом (а, б); МДП-транзистора с индуцированным каналом (в, г) и МДП-транзистора со встроенным каналом (д, е) (все три типа транзисторов имеют канал n -типа).

Дифференциальные параметры полевых транзисторов

Основными дифференциальными параметрами полевых транзисторов являются:

$$\text{крутизна } S = \left. \frac{d I_c}{d U_{зи}} \right|_{U_{си} = \text{const}} ;$$

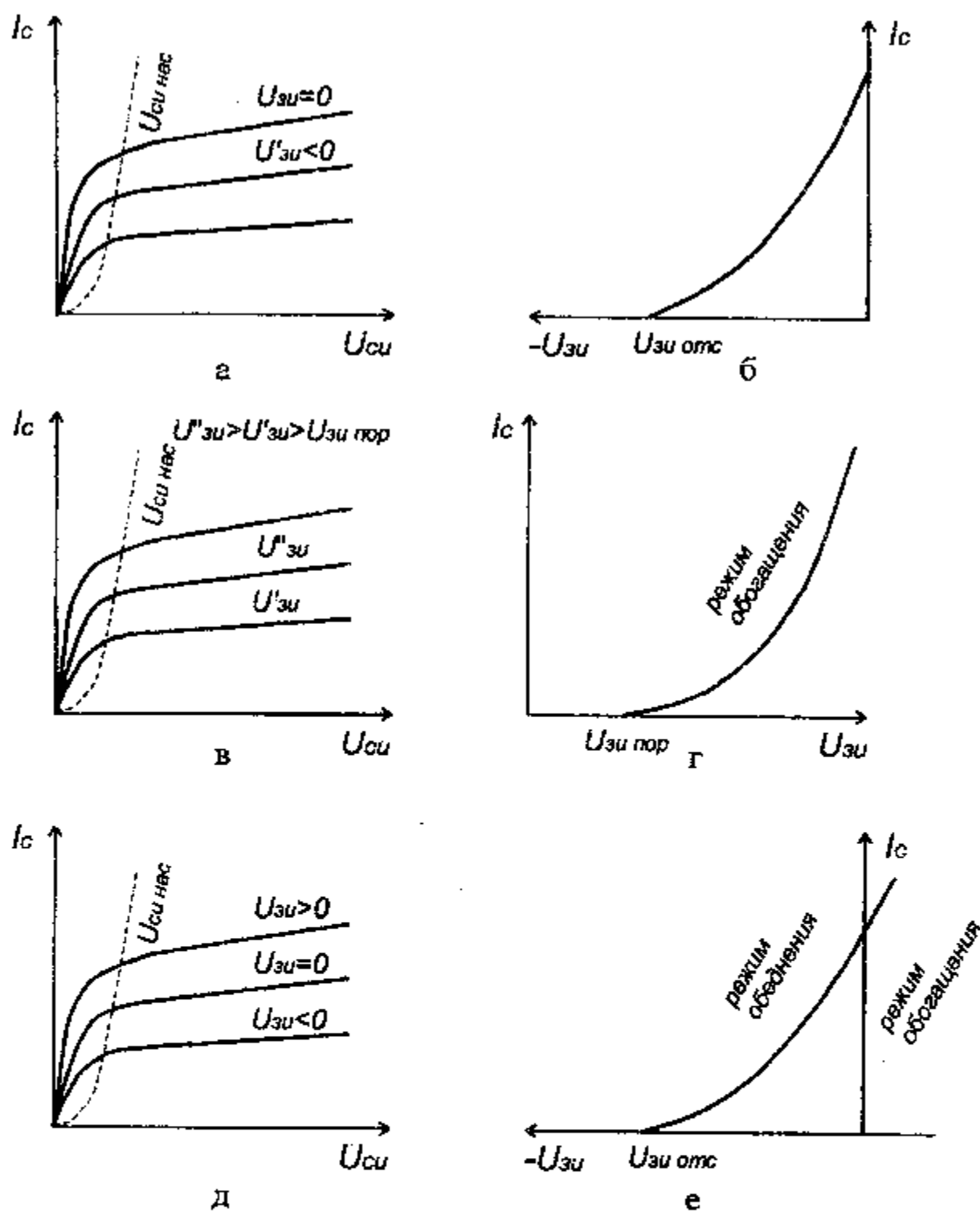


Рис. 4

внутреннее (дифференциальное) сопротивление

$$R_i = \left. \frac{d U_{ce}}{d I_c} \right|_{U_{be} = \text{const}} ;$$

статический коэффициент усиления $\mu = \left. \frac{d U_{ce}}{d U_{be}} \right|_{I_c = \text{const}}$

Все три параметра связаны уравнением $\mu = SR_i$;

Параметры транзисторов можно определить по статическим характеристикам, как показано на рис. 5. Для рабочей точки А ($U'_{си}$, I'_c , $U'_{зи}$) крутизна и дифференциальное сопротивление определяются следующими выражениями:

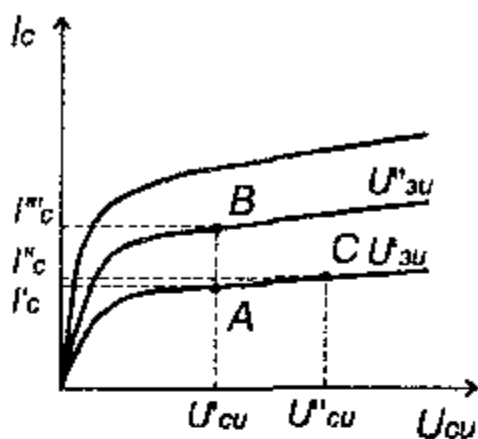


Рис. 5

$$S = \left. \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зи}} \right|_{U_{си} = U'_{си}} = \left. \frac{I''_c - I'_c}{U''_{зи} - U'_{зи}} \right|_{U_{си} = U'_{си}};$$

$$R_i = \left. \frac{\Delta U_{си}}{\Delta I_c} \right|_{U_{зи} = U'_{зи}} = \left. \frac{U''_{си} - U'_{си}}{I''_c - I'_c} \right|.$$

Широкое распространение получают полевые транзисторы с барьером Шотки. Перспективными транзисторами являются полевые транзисторы на арсениде галлия, работающие на частотах до 20 ГГц, которые можно использовать в маломощных усилителях СВЧ, усилителях мощности и генераторах. Условное обозначение полевых транзисторов на принципиальных схемах и режимы работы приведены в табл. 1.

Для маркировки биполярных транзисторов используется буквенно-цифровая система условных обозначений согласно ОСТ 11.336.038-77, такая же, как и для биполярных транзисторов.

Для маркировки биполярных транзисторов используется буквенно-цифровая система условных обозначений согласно ОСТ 11.336.038-77, такая же, как и для биполярных транзисторов.

Порядок выполнения работы

1. Типы исследуемых транзисторов приведены в карточке задания. Используя паспортные данные транзисторов, определить область электрически безопасных режимов работы для каждого исследуемого прибора и нанести границы этой области в системе координат ток-напряжение, как показано на рис. 6.

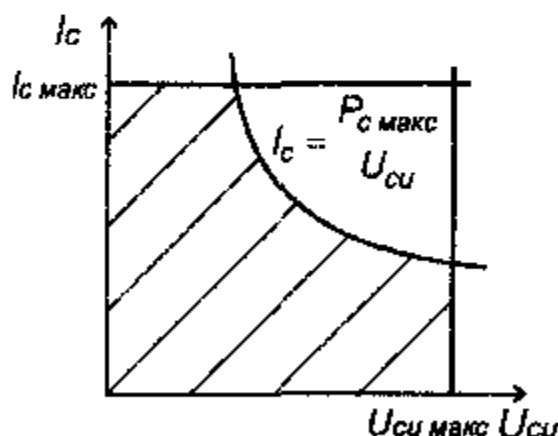


Рис. 6

Внимание!!! Для предотвращения электрического повреждения транзисторов измерения проводить только в области дозванных режимов работы, не выходя за ее границы.

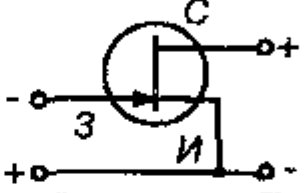
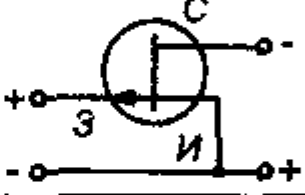
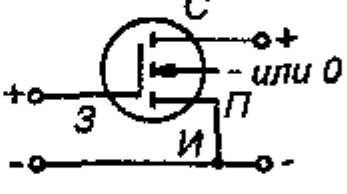
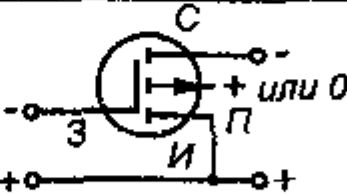
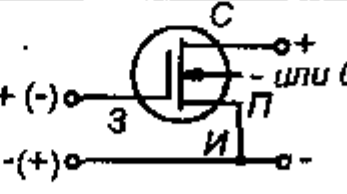
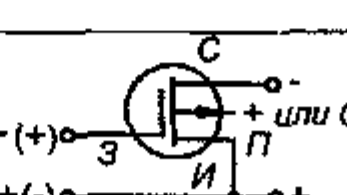
2. Собрать схему для исследования характеристик выданного полевого транзистора с управляющим р-п-переходом в схеме с ОИ (рис. 7). Обратить внимание на

тип проводимости канала. На рис. 7,а приведена схема для исследования транзистора с каналом п-типа, а на рис. 7,б – с каналом р-типа.

3. Снять сток-затворную характеристику $I_c = f(U_{зи})$ при $U_{си} = 6 \text{ В}$ ($I_c < 10 \text{ мА}$) и определить напряжение ($U_{зи \text{ отс.}}$).

4. Снять семейство выходных характеристик $I_c = f(U_{си})$ при $U_{зи} = 0 \text{ В}; 0,3U_{зи \text{ отс.}}; 0,6U_{зи \text{ отс.}}$. Напряжение $U_{си}$ изменять от 0 до 10 В ($I_c < 10 \text{ мА}$).

Таблица 1

Тип полевого транзистора	Тип канала	Тип подложки	Условное обозначение и полярности внешних напряжений	Режим работы
Транзистор с управляющим р-п-переходом	п	р		—
	р	п		—
МДП-транзистор с индуцированным каналом	п	р		Обогащение
	р	п		Обогащение
МДП-транзистор со встроенным каналом	п	р		Обогащение (обеднение)
	р	п		Обогащение (обеднение)

5. Рассчитать дифференциальные параметры S , R_i , μ полевого транзистора с управляющим р-п-переходом в заданной рабочей точке.

6. Собрать схему с ОИ для исследования характеристик МДП-транзистора с индуцированным каналом (рис. 8). Обратить внимание на тип проводимости канала. На рис. 8,а приведена схема для исследования транзистора с каналом п-типа, а на рис. 8,б – с каналом р-типа.

7. Снять сток-затворную характеристику $I_c = f(U_{зи})$ при $U_{си} = 6 \text{ В}$ ($I_c < 10 \text{ мА}$) и определить значение $U_{зи \text{ пор}}$.

8. Снять семейство выходных характеристик $I_c = f(U_{си})$ при $U_{зи} = 1,5 U_{зи \text{ пор}}$; $2,5 U_{зи \text{ пор}}$; $3,5 U_{зи \text{ пор}}$ ($I_c < 10 \text{ мА}$). Напряжение $U_{си}$ изменять от 0 до 10 В.

9. Рассчитать дифференциальные параметры S , R_i , μ полевого МДП-транзистора в заданной рабочей точке.

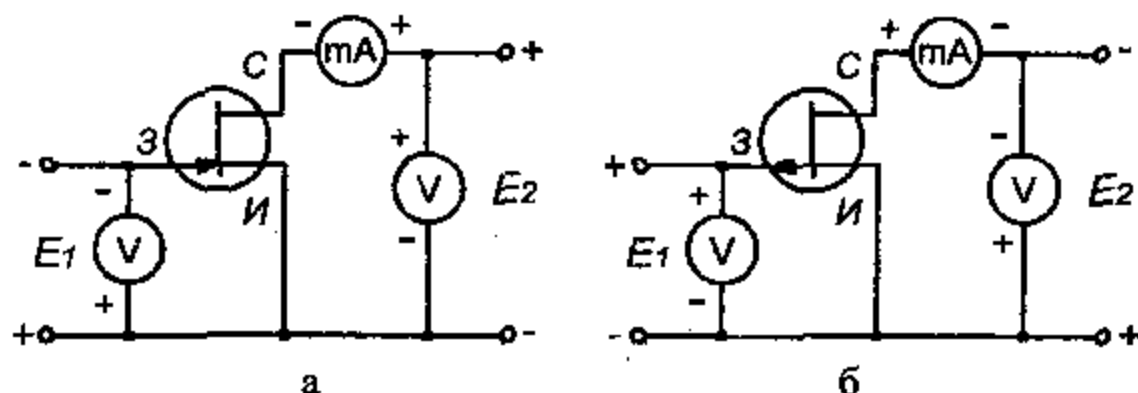


Рис. 7

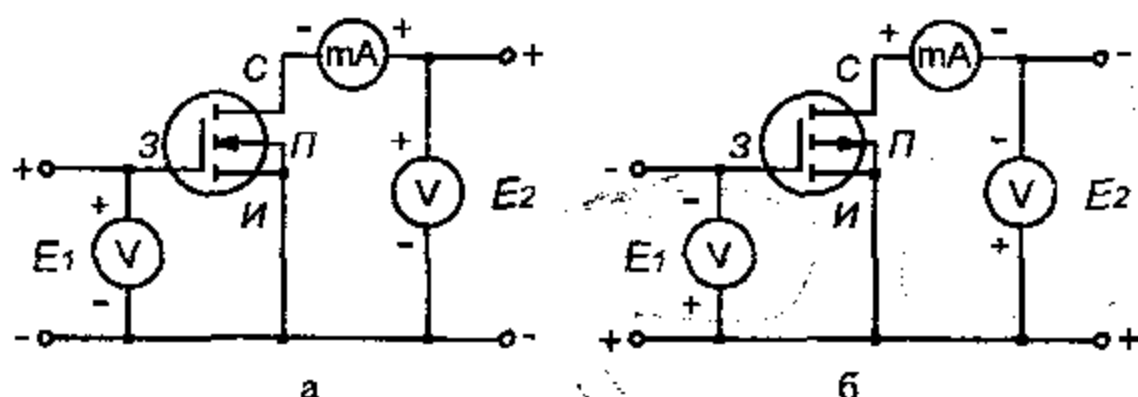


Рис. 8

Содержание отчета

1. Паспортные данные исследуемых транзисторов.
2. Схемы для исследования полевых транзисторов.

3. Полученные семейства статических характеристик исследованных транзисторов в схеме с ОИ.

4. Расчет дифференциальных параметров транзисторов.

Контрольные вопросы

1. Основные элементы конструкций полевого транзистора с управляющим р-п-переходом и МДП-транзисторов.

2. Принцип действия МДП-транзисторов со встроенным и индуцированным каналом. Режимы работы этих транзисторов.

3. Устройство и принцип действия полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом.

4. Объяснить характер и поведение характеристики прямой передачи и выходных характеристик. Что такое напряжение $U_{зи\text{ отс}}$ и $U_{зи\text{ пор}}$?

5. Области применения полевых транзисторов?

6. Какие существуют разновидности полевых транзисторов?

7. Почему полевой транзистор обладает усилительными свойствами?

8. Устройство и принцип действия полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом и МДП-транзисторов с встроенным и индуцированным каналом?

9. Какими физическими явлениями ограничивается диапазон рабочих частот в ПТ?

10. В чем отличие статических характеристик ПТ с управляющим р-п-переходом и МДП-транзисторов с встроенным и индуцированным каналом?

11. Каков физический смысл дифференциальных параметров S , R_i , μ полевых транзисторов?

Литература

1. Электронные приборы / Под ред. Г.Г. Шишкина. – М.: Издательство МАИ, 1996.

2. Батушев В.А. Электронные приборы. – М.: Высш. шк., 1980.

3. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. – М.: Высш. шк., 1991.

4. Ткаченко Ф.А., Хандогин М.С. Учеб. пособие по курсу "Электронные приборы". – Мн.: БГУИР, 1997.

5. Галкин В.И., Булычев А.Л., Лямин П.М. Полупроводниковые приборы: Транзисторы широкого применения: Справочник. – Мн.: Беларусь, 1995.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

Цель работы

1. Изучить устройство, принцип действия, систему обозначений, области применения, параметры и характеристики полупроводниковых излучательных приборов (светодиодов).
2. Изучить устройство, принцип действия, систему обозначения, области применения, параметры и характеристики полупроводниковых приемников оптического излучения.
3. Экспериментально исследовать ВАХ и параметры оптопар.

Краткие теоретические сведения

Оптоэлектроника – это раздел электроники, изучающий взаимодействие электронов с электромагнитными колебаниями оптического диапазона и вопросы построения электронных приборов, использующих в качестве носителя информации электромагнитные волны оптического диапазона. Физические свойства оптического излучения зависят от длины волны, в связи с чем оптический диапазон ($\lambda = 10 \text{ нм} \dots 1 \text{ мм}$) делится на поддиапазоны, в пределах которых физические свойства волн одинаковы: ультрафиолетовое излучение $\lambda = 0,01 \dots 0,4 \text{ мкм}$; видимое излучение $\lambda = 0,38 \dots 0,78 \text{ мкм}$; инфракрасное излучение $\lambda = 0,78 \text{ мкм} \dots 1,0 \text{ мм}$. Световой луч в оптоэлектронике выполняет те же функции управления, преобразования и связи, что и электрический сигнал в электрических цепях.

В оптических цепях носителями сигналов являются электрически нейтральные фотоны, которые в световом потоке не взаимодействуют между собой, не смешиваются и не рассеиваются. Оптические цепи не подвержены влиянию электрических и магнитных полей. Использование в качестве носителя информации электрически нейтральных фотонов обеспечивает: идеальную электрическую развязку входной и выходной цепей оптоэлектронного элемента связи, однонаправленность передачи и отсутствие влияния приемника на передатчик, высокую помехозащищенность оптических каналов связи вследствие невосприимчивости фотонов к воздействию электрических и магнитных полей, отсутствие влияния паразитных емкостей на длительность переходных процессов в канале связи и отсутствие паразитных связей между каналами, а также хорошее согласование цепей с разными входными и выходными сопротивлениями.

Невосприимчивость оптического излучения к различным внешним воздействиям и электронейтральность фотона являются не только достоинства-

ми, но и недостатками, так как затрудняют управление интенсивностью и распространением светового потока.

Компоненты оптоэлектроники и электроники существуют, не отрицая друг друга, а каждый из них используется в той области, где применение его целесообразно.

В устройствах оптоэлектроники передача информации от управляемого источника света (фотоизлучателя) к фотоприемнику осуществляется через светопроводящую среду (воздух, вакуум, световоды), выполняющую роль проводника оптического излучения. Световодные линии являются эквивалентами электрических проводников и характеризуются большой пропускной способностью, возможностью совмещать в одном световоде большое число каналов связи при очень высокой скорости передачи информации, достигающих гигабит в секунду. Оптическое излучение легко разделяется по длинам волн, поэтому можно объединять в одном световоде несколько каналов информации.

Оптоэлектронные устройства могут быть изготовлены по интегральной технологии. Оптические интегральные схемы обладают широкой полосой пропускания, невосприимчивостью к вибрации, повышенной надежностью, экономичностью при серийном производстве, малыми размерами и массой.

Излучающие приборы преобразуют электрическую энергию в энергию оптического излучения с определенной длиной волны или в узком диапазоне длин волн. В основе работы управляемых источников оптического излучения лежит одно из следующих физических явлений: температурное свечение, газоразрядное излучение, электролюминесценция, индуцированное излучение. Источники излучения бывают когерентными и некогерентными. Лампы накаливания, газоразрядные лампы, электролюминесцентные элементы, инжекционные светодиоды являются некогерентными источниками излучения. Когерентными источниками излучения являются лазеры.

Принцип действия полупроводниковых излучающих приборов основан на явлении электролюминесценции. Электролюминесценцией называют явление излучения света телами под действием электрического поля. Электролюминесценция является частным случаем люминесценции. Под люминесценцией понимают электромагнитное нетепловое излучение, обладающее длительностью, значительно превышающей период световых колебаний. Люминесцировать могут твердые, жидкие и газообразные тела. В оптоэлектронных приборах используется люминесценция кристаллических примесных полупроводников с широкой запрещенной зоной. Для работы в диапазоне видимого излучения (0,38...0,78 мкм) используются полупроводники с

шириной запрещенной зоны 1,5...3,0 эВ. В полупроводниках генерация оптического излучения обеспечивается инжекционной электролюминесценцией. Генерация оптического излучения в р-п-переходе объединяет два процесса: инжекцию носителей и электролюминесценцию.

Светодиод

Одним из наиболее распространенных источников оптического излучения является светодиод – полупроводниковый прибор с одним или несколькими электрическими переходами, преобразующий электрическую энергию в энергию обычного некогерентного светового излучения, при смещении р-п-перехода в прямом направлении. На рис. 1 показана конструкция плоского, а на рис. 2 – полусферического светодиода.

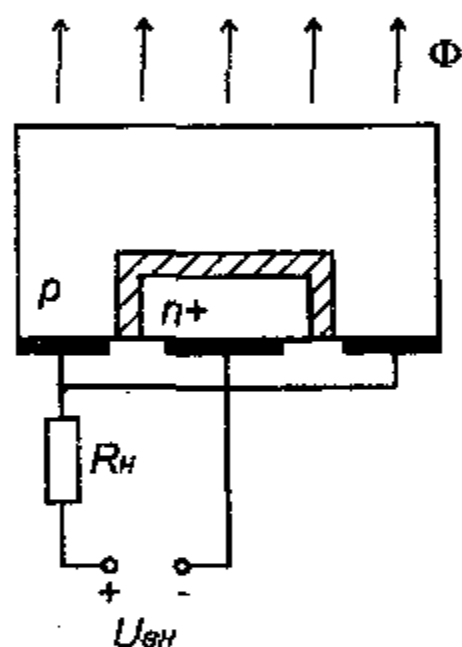


Рис. 1

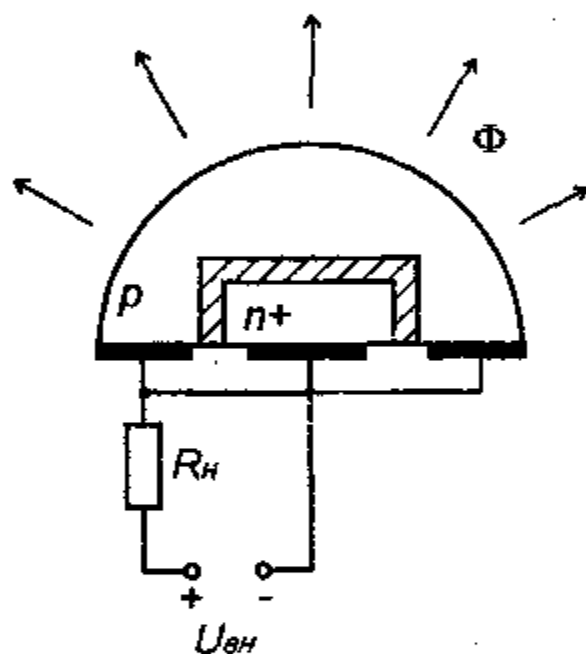


Рис. 2

При приложении прямого напряжения $U_{вн}$ к р-п-переходу происходит диффузионный перенос носителей через переход. Увеличивается инжекция дырок в n-область, а электронов в p-область. Прохождение тока через р-п-переход в прямом направлении сопровождается рекомбинацией инжектированных неосновных носителей заряда. Рекомбинация происходит как в самом р-п-переходе, так и в примыкающих к переходу слоях, ширина которых определяется диффузионными длинами L_n и L_p . В большинстве полупроводников рекомбинация осуществляется через примесные центры (ловушки) вблизи середины запрещенной зоны и сопровождается выделением тепловой энергии – фонона. Такая рекомбинация называется безызлучательной. В ряде

случаев процесс рекомбинации сопровождается выделением кванта света — фотона. Это происходит у полупроводников с большой шириной запрещенной зоны — прямозонных полупроводников. Электроны с более высоких энергетических уровней зоны проводимости переходят на более низкие энергетические уровни валентной зоны (переход зона — зона), при рекомбинации происходит выделение фотонов и возникает некогерентное оптическое излучение. Из-за относительно большой ширины запрещенной зоны исходного полупроводника рекомбинационный ток р-п-перехода оказывается большим по сравнению с током инжекции, особенно при малых прямых напряжениях, процесс рекомбинации в этом случае реализуется в основном в р-п-переходе.

Излучательная способность светодиода характеризуется:

1) внутренней квантовой эффективностью (или внутренним квантовым выходом), определяемой отношением числа генерируемых фотонов к числу инжектированных в активную область носителей заряда за один и тот же промежуток времени. Так как часть фотонов покидает полупроводник, а другая часть отражается от поверхности полупроводника и затем поглощается объемом полупроводника, то вводится понятие квантовой эффективности излучения;

2) внешней квантовой эффективностью излучения (квантовым выходом), определяемой отношением числа фотонов, испускаемых диодом во внешнее пространство, к числу инжектируемых носителей через р-п-переход.

Внешний квантовый выход является интегральным показателем излучательной способности светодиода, который учитывает эффективность инжекции, электролюминесценцию и вывод излучения во внешнее пространство. С целью повышения эффективности вывода излучения светодиода используют различные конструкции (рис. 1, 2): полусферы, отражающие металлизированные поверхности и др., у которых практически отсутствует полное внутреннее отражение.

Основными характеристиками светодиодов являются: вольт-амперная, яркостная, спектральная.

На рис. 3 представлены ВАХ светодиодов из разных полупроводниковых материалов. Различие прямых ветвей ВАХ из разных полупроводниковых материалов связано с различной шириной запрещенной зоны. Чем больше прямое падение напряжения на диоде, тем меньше длина волны излучения и больше потери электрической энергии в нем. Обратные ветви ВАХ имеют относительно малые пробивные напряжения, что объясняется малой толщиной р-п-переходов. Светодиоды работают преимущественно при

прямом включении. При работе в схеме с большими обратными напряжениями последовательно со светодиодом необходимо включать обычный (неизлучающий) диод, имеющий достаточное значение допустимого обратного напряжения.

Яркостная характеристика – это зависимость яркости излучения от величины тока, протекающего через р-п-переход (рис. 4).

Спектральная характеристика – зависимость интенсивности излучения от длины волны излучаемого света или от энергии излучаемых квантов (рис. 5). Длина волны излучения определяется разностью двух энергетических уровней, между которыми происходит переход электронов при люминесценции. Поэтому светодиоды на основе полупроводников с разной шириной запрещенной зоны имеют спектральные характеристики с максимумом излучения при различных длинах волн.

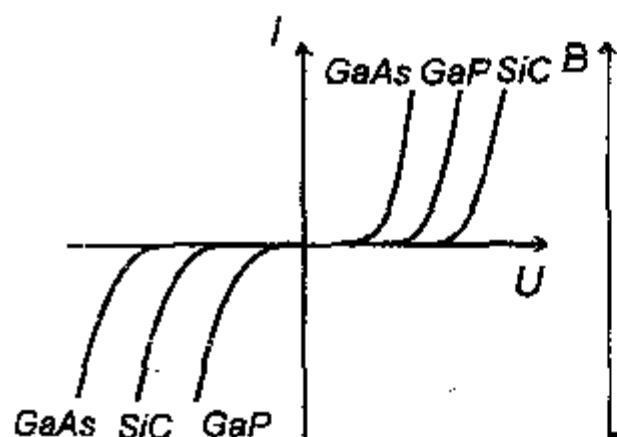


Рис. 3

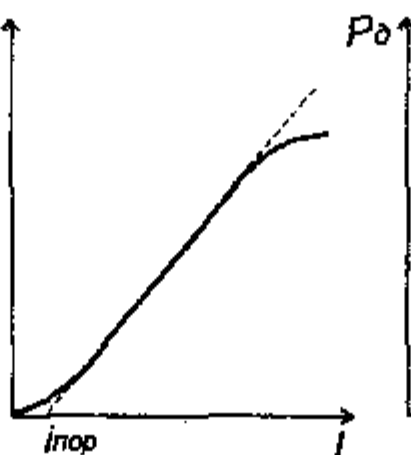


Рис. 4

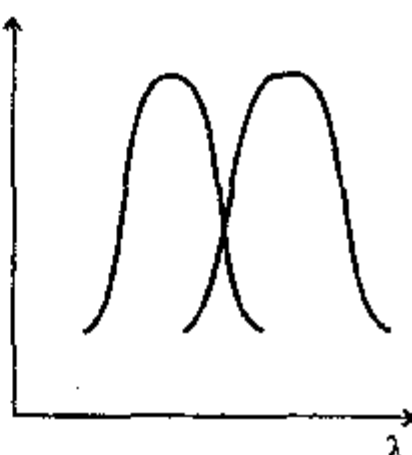


Рис. 5

Параметры светодиодов

Сила света I_v – световой поток, приходящийся на единицу телесного угла в заданном направлении, выражается в канделах (кд) и составляет десятые доли...единицы милликандел. Кандела есть единица силы света, испускаемого специальным стандартным источником.

Яркость излучения – отношение силы света к площади светящейся поверхности. Она составляет десятки...сотни кандел на квадратный сантиметр.

Постоянное прямое напряжение – падение напряжения на диоде при заданном токе (2...4 В).

Цвет свечения или длина волны, соответствующая максимальному световому потоку.

Максимально допустимый постоянный прямой ток составляет десятки миллиампер и определяет максимальную яркость излучения.

Максимальное допустимое постоянное обратное напряжение (единицы вольт).

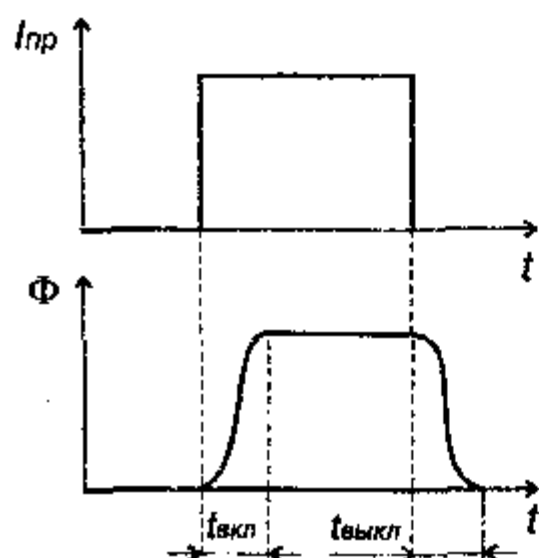


Рис. 6

Быстродействие излучающего диода определяется инерционностью возникновения излучения при подаче прямоугольного импульса прямого тока (рис. 6).

Время переключения $t_{пер}$ складывается из времени включения $t_{вкл}$ и выключения $t_{выкл}$ излучения. Инерционность излучающего диода определяется процессом перезарядки барьерной емкости и процессами накопления и рассасывания неосновных носителей в активной области диода.

Фотоприемники

Фотоприемники — это оптоэлектронные приборы, предназначенные для преобразования энергии оптического излучения в электрическую энергию. Функции фотоприемников могут выполнять фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры и т.д. Для получения максимального преобразования оптического излучения в электрический сигнал необходимо согласовывать спектральные характеристики фотоизлучателей и фотоприемников.

Работа фотоприемников основана на одном из трех видов фотоэлектрических явлений:

внутреннем фотоэффекте — изменении электропроводности вещества при его освещении;

внешнем фотоэффекте — испускании веществом электронов под действием света (используется в вакуумных и газонаполненных фотоэлементах);

фотоэффекте в запирающем слое — возникновении ЭДС на границе двух материалов под действием света.

Фоторезисторы

Фоторезистором называют полупроводниковый фотоэлектрический прибор с внутренним фотоэффектом, в котором используется явление фотопроводимости, т.е. изменение электрической проводимости полупроводника под действием оптического излучения.

Фоторезистор обладает начальной проводимостью σ_0 , которую называют темновой $\sigma_0 = q(n_0\mu_n + p_0\mu_p)$, где q — заряд электрона; n_0 , p_0 — кон-

центрация подвижных носителей заряда в полупроводнике в равновесном состоянии; μ_n , μ_p – подвижность электронов и дырок соответственно. Под действием света в полупроводнике генерируются избыточные подвижные носители заряда, концентрация которых увеличивается на величину Δn и Δp , а проводимость полупроводника изменяется на величину $\sigma_{\phi} = q(\mu_n \Delta n + \mu_p \Delta p)$, называемую фотопроводимостью. При изменении яркости освещения изменяется фотопроводимость полупроводника. Увеличение проводимости полупроводника при освещении фоторезистора приводит к возрастанию тока в цепи. Разность токов при наличии и отсутствии освещения называют световым током или фототоком.

Характеристики и параметры фоторезистора

ВАХ представляет собой зависимость тока I_{ϕ} через фоторезистор от напряжения U , приложенного к его выводам, при неизменной величине светового потока (рис. 7). В рабочем диапазоне напряжений ВАХ фоторезисторов при различных значениях светового потока практически линейны (линейны в пределах допустимой для них мощности рассеяния).

Энергетическая (световая или люкс-амперная) характеристика представляет собой зависимость фототока от падающего светового потока при постоянном напряжении на фоторезисторе (рис. 8).

Спектральная характеристика фоторезистора – зависимость чувствительности от длины волны падающего светового потока (рис. 9).

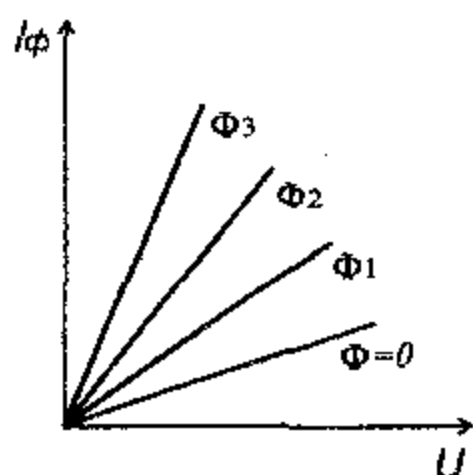


Рис. 7

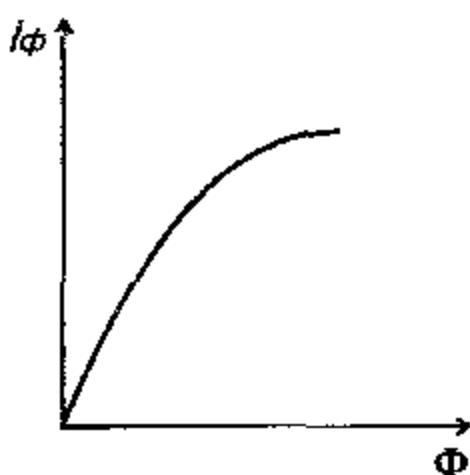


Рис. 8

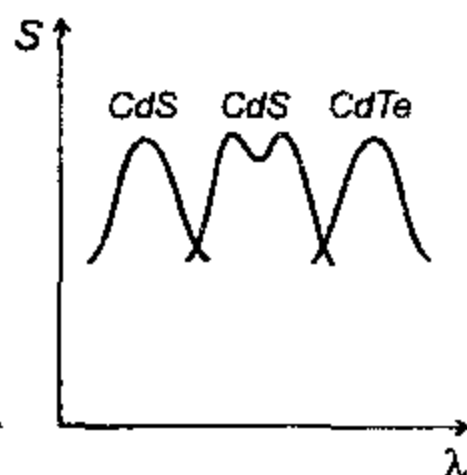


Рис. 9

Параметрами фоторезистора являются:

Темновое сопротивление – сопротивление фоторезистора при отсутствии освещения. Оно измеряется через 30 с после затемнения фоторезистора,

предварительно находящегося под освещенностью 200 лк и составляет $10^4 \dots 10^7$ Ом.

Удельная интегральная чувствительность — отношение фототока к произведению светового потока на приложенное напряжение

$$S_{\phi \text{ инт}} = \frac{I_{\phi}}{\Phi U}.$$

Чувствительность называют интегральной, потому что ее измеряют при освещении фоторезистора светом сложного спектрального состава при освещенности 200 лк. Она лежит в пределах от десятых долей до сотен миллиампер на вольт.

Граничная частота $f_{гр}$ — это частота синусоидального сигнала, модулирующего световой поток, при котором чувствительность фоторезистора уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с чувствительностью при немодулированном потоке $f_{гр} = 10^3 \dots 10^5$ Гц.

Температурный коэффициент фототока — коэффициент, показывающий изменение фототока при изменении температуры и постоянном световом потоке

$$\alpha_T = \frac{\partial I_{\phi}}{I_{\phi}} \frac{1}{\Delta T}; \quad \Phi - \text{const}; \quad \alpha_T = -10^{-3} \dots 10^{-4} \text{ град}^{-1}.$$

Фотодиоды

Фотодиодом называют полупроводниковый фотоэлектрический прибор, в котором используется внутренний фотоэффект. Устройство фотодиода аналогично устройству обычного плоскостного диода. Отличие состоит в том, что его р-п-переход одной стороной обращен к стеклянному окну, через которое поступает свет, и защищен от воздействия света с другой стороны.

Фотодиоды могут работать в одном из двух режимов:

без внешнего источника электрической энергии — вентильный, фотогенераторный или фотогальванический режим;

с внешним источником электрической энергии — фотодиодный или фотопреобразовательный режим.

Рассмотрим работу фотодиода в вентильном режиме, схема включения представлена на рис. 10. При отсутствии светового потока на границе р-п-перехода создается контактная разность потенциалов. Через переход навстречу друг другу протекают два тока $I_{диф}$ и $I_{др}$, которые уравнивают друг друга. При освещении р-п-перехода фотоны, проходя в толщу полупроводника, сообщают части валентных электронов энергию, достаточную для

перехода их в зону проводимости, т.е. за счет внутреннего фотоэффекта генерируются дополнительные пары электрон-дырка. Под действием контактной разности потенциалов р-п-перехода неосновные носители заряда п-области — дырки — переходят в р-область, а неосновные носители заряда р-области электроны — в п-область. Дрейфовый ток получает дополнительное приращение, называемое фототоком $I_{\text{ф}}$. Дрейф неосновных носителей приводит к накоплению избыточных дырок в р-области, а электронов — в п-области. Это приводит к созданию на зажимах фотодиода при разомкнутой внешней цепи разности потенциалов, называемой фотоЭДС.

Фотодиоды, работающие в режиме фотогенератора, часто используются в качестве источников питания, преобразующих энергию солнечного излучения в электрическую.

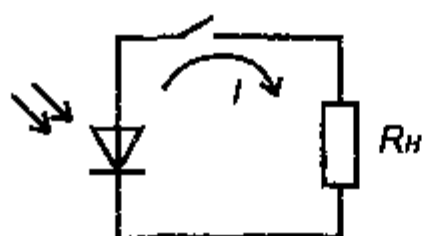


Рис. 10

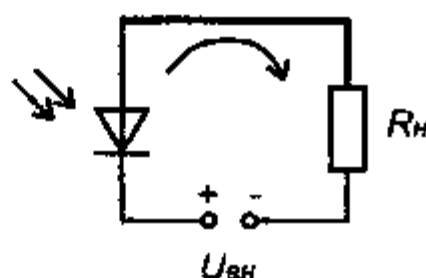


Рис. 11

В фотодиодном или фотопреобразовательном режиме работы последовательно с фотодиодом включается внешний источник энергии, смещающий диод в обратном направлении (рис. 11). При отсутствии светового потока под действием обратного напряжения через фотодиод протекает обычный начальный обратный ток I_0 , который называют темновым. Темновой ток ограничивает минимальное значение светового потока. При освещении фотодиода кванты света выбивают электроны из валентных связей полупроводника. Увеличивается поток неосновных носителей заряда через р-п-переход. Чем больше световой поток, падающий на фотодиод, тем выше концентрация неосновных носителей заряда вблизи обедненного слоя и тем больший фототок, определяемый напряжением внешнего источника и световым потоком, протекает через диод.

Фотодиодный режим характеризуется высокой чувствительностью, большим динамическим диапазоном преобразования оптического излучения, высоким быстродействием (барьерная емкость р-п-перехода уменьшается). Недостатком фотодиодного режима работы является зависимость темнового тока (обратного тока р-п-перехода) от температуры.

Если к неосвещенному фотодиоду подключить источник напряжения, значение и полярность которого можно изменять, то снятые при этом ВАХ будут иметь такой же вид, как у обычного полупроводникового диода (рис. 12). При освещении фотодиода существенно изменяется лишь обратная ветвь ВАХ, прямые же ветви практически совпадают. В квадранте III фотодиод работает в фотодиодном режиме, а в квадранте IV – в фотовентильном режиме, т.е. фотодиод становится источником электрической энергии. Квадрант I – это нерабочая область для фотодиода, в этом квадранте р-n-переход смещен в прямом направлении.

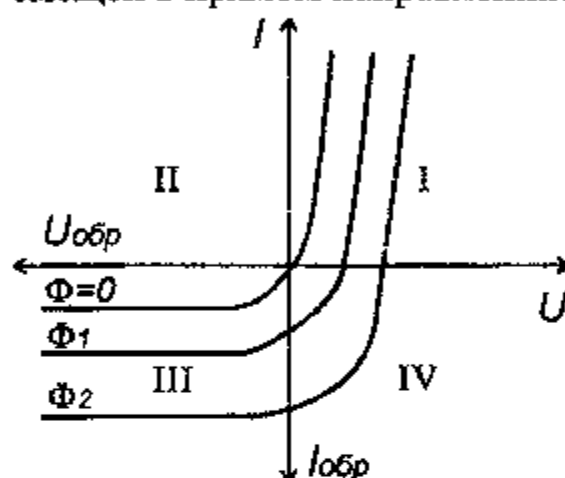


Рис. 12

Параметрами фотодиодов являются:

Темновой ток I_T – начальный обратный ток, протекающий через диод при отсутствии внешнего смещения и светового излучения (10...20 мкА для германиевых и 1...2 мкА для кремниевых диодов).

Рабочее напряжение U_p – номинальное напряжение, прикладываемое к фотодиоду в фотодиодном режиме $U_p = 10...30$ В.

Интегральная чувствительность $S_{\text{инт}}$, показывающая, как изменяется фототок при единичном изменении светового потока:

$$S_{\text{инт}} = dI_{\Phi} / d\Phi.$$

Граничная частота $f_{\text{гр}}$ – частота, при которой интегральная чувствительность уменьшается в $\sqrt{2}$ раз ($f_{\text{гр}} = 10^6...10^{12}$ Гц).

Фототранзисторы

Фототранзистором называют полупроводниковый управляемый оптическим излучением прибор с двумя взаимодействующими р-n-переходами.

Фототранзисторы, как и обычные транзисторы, могут иметь р-n-р- и п-р-n-структуру. Конструктивно фототранзистор выполнен так, что световой поток облучает область базы. Наибольшее практическое применение нашло включение фототранзистора в схему с ОЭ, при этом нагрузка включается в коллекторную цепь. Входным сигналом фототранзистора является модулированный световой поток, а выходным – изменение напряжения на резисторе нагрузки в коллекторной цепи.

Напряжение питания на фототранзистор подают, как и на обычный биполярный транзистор, работающий в активном режиме, т.е. эмиттерный пе-

реход смещен в прямом направлении, а коллекторный – в обратном (рис. 13,а). Однако он может работать и с отключенным выводом базы (рис. 13, б), а напряжение прикладывается между эмиттером и коллектором. Такое включение называется включением с плавающей базой и характерно только для фототранзисторов. При этом фототранзистор работает в активном режиме близко к границе отсечки. При $\Phi = 0$ ток очень мал и равен темновому току

$$I_T = \frac{I_{k0}}{1 - \alpha}.$$

ВАХ аналогичны выходным характеристикам биполярного транзистора, включенного по схеме с ОЭ, где параметром является не ток базы, а световой поток или фототок при $I_b = \text{const}$ (рис. 13,в).

Энергетические и спектральные характеристики такие же, как у фотодиода.

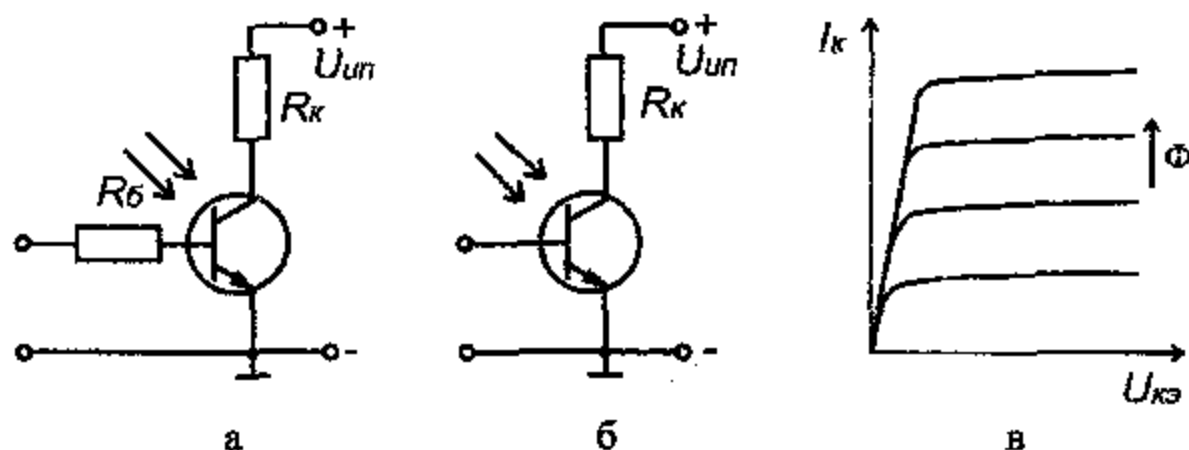


Рис. 13

Основными параметрами фототранзистора являются:

рабочее напряжение (10...15 В);

темновой ток (до сотен микроампер);

рабочий ток (до десятков миллиампер);

максимально допустимая мощность рассеяния (до десятков ватт);

статический коэффициент усиления по фототоку $K_{yf} = (1 + h_{21Э})$, который измеряется как отношение фототока коллектора транзистора с плавающей базой к фототоку коллекторного перехода при отключенном эмиттере и постоянном световом потоке и лежит в диапазоне значений $(1..6) \cdot 10^2$;

интегральная чувствительность – отношение фототока к падающему световому потоку, составляет 0,2...2 А/лм, что в $(1 + h_{21Э})$ раз выше по сравнению с чувствительностью эквивалентного диода.

тока на выходе оптрона $I_{\text{вых}}$ к вызвавшему его входному току $I_{\text{вх}}$: для статического режима $K_i = I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}}$; для динамического режима $K_{i\text{д}} = dI_{\text{вых}}/dI_{\text{вх}}$.

Зависимость $I_{\text{вых}} = f(I_{\text{вх}})$ называется передаточной характеристикой и имеет нелинейный характер.

Порядок выполнения работы

1. Тип исследуемой оптопары приведен в карточке задания. Используя паспортные данные прибора, определить область электрически безопасных режимов работы фотоизлучателя и фотоприемника, входящих в состав оптопары. **Внимание!!!** Для предотвращения электрического повреждения прибора измерения проводить только в области дозволённых режимов работы, не выходя за ее границы.

2. Собрать схему для исследования предложенной оптопары (одна из схем на рис. 15).

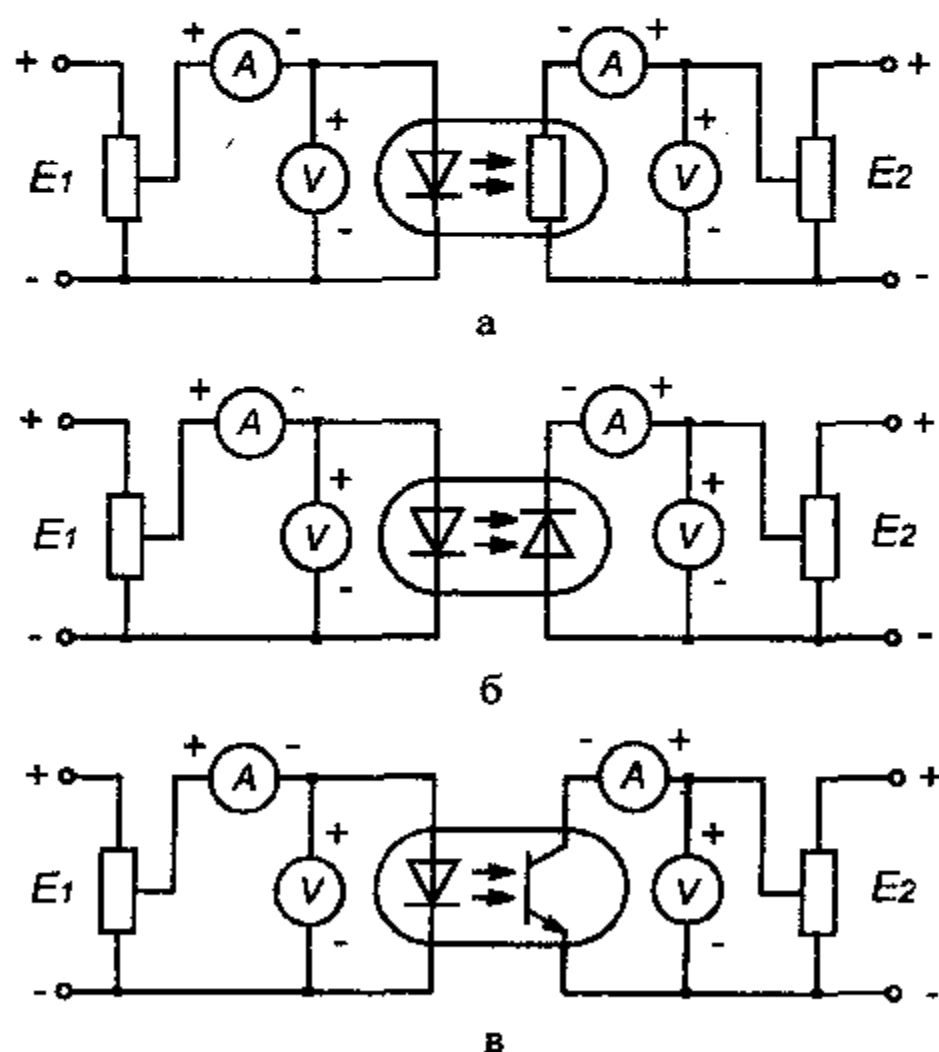


Рис. 15

3. Исследовать ВАХ излучателя (светодиода) $I_{\text{вх}} = f(U_{\text{вх}})$.
4. Исследовать семейство ВАХ приемника оптического излучения $I_{\text{вых}} = f(U_{\text{вых}})$, при $I_{\text{вх}} = \text{const}$.
5. Исследовать семейство передаточных характеристик оптопары $I_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ при $U_{\text{вых}} = \text{const}$.

Содержание отчета

1. Паспортные данные исследуемых приборов.
2. Схемы для исследования ВАХ.
3. Семейства статических характеристик исследуемых приборов.
4. Расчет параметров оптоэлектронных приборов.

Контрольные вопросы

1. Принцип действия полупроводниковых излучательных приборов.
2. Характеристики и параметры светодиода.
3. На каких фотоэлектрических явлениях основана работа фотоприемников: фоторезистора, фотодиода, фототранзистора?
4. Принцип работы, характеристики и параметры фотоприемников: фоторезисторов, фотодиодов, фототранзисторов.
5. Принцип работы оптопар, разновидности оптопар.
6. Параметры оптопар.

Литература

1. Электронные приборы / Под ред. Г.Г. Щипкина. – М.: Издательство МАИ, 1996.
2. Батушев В.А. Электронные приборы. – М.: Высш. шк., 1980.
3. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. – М.: Высш. шк., 1991.
4. Ткаченко Ф.А., Хандогин М.С. Учебн. пособие по курсу "Электронные приборы". – Мн.: БГУИР, 1997.
5. Полупроводниковые приборы: Диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы. Справочник / Под общ. ред. Н.Н. Горюнова. – М.: Энергоатомиздат, 1983.

Авторы: Бельский Алексей Якимович,
Березовский Валентин Константинович,
Валенко Валентин Стефанович,
Дробот Сергей Викторович,
Дунаева Галина Павловна,
Мельников Владимир Александрович,
Путилин Владимир Николаевич,
Русакович Владимир Николаевич,
Ткаченко Федор Алексеевич,
Хандогин Михаил Степанович

Лабораторный практикум
по курсу
ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ
для студентов всех специальностей БГУИР
В 2-х частях

Часть 1

Активные компоненты полупроводниковой электроники

Редактор Е.Н. Батурчик

Подписано в печать 15.10.99.

Формат 60×84 1/16

Бумага офсетная. Печать ~~рисографическая~~ **ризографическая**.

Усл.—печ.л. 3, 14.

Уч.—изд.л. 2, 9.

Тираж 600 экз.

Заказ 477.

Белорусский государственный университет информатики и
радиоэлектроники

Отпечатано в БГУИР. Лицензия ЛП № 156. 220027, Минск, П.Бровки, 6