

6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

Цель работы:

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

6.1. 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 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 достоинствами, но и недостатками, т. к. затрудняют управление интенсивностью и распространением светового потока.

В устройствах оптоэлектроники передача информации от управляемого источника света (фотоизлучателя) к фотоприемнику осуществляется через светопроводящую среду (воздух, вакуум, световоды), исполняющую роль провод-

ника 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 некогерентного светового излучения, при смещении р-п-перехода в прямом направлении. На рис. 6.1, а показана конструкция плоского, а на рис. 6.1, б – полусферического светодиода.

При приложении прямого напряжения $U_{пр}$ к р-п-переходу происходит диффузионный перенос носителей через переход. Увеличивается инжекция ды-

рок в n-область, а электронов – в p-область. Прохождение тока через p-n-переход в прямом направлении сопровождается рекомбинацией инжектированных неосновных носителей заряда. Рекомбинация происходит как в самом p-n-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 в полупроводниках с большой шириной запрещенной зоны – прямозонных полупроводниках. Электроны с более высоких энергетических

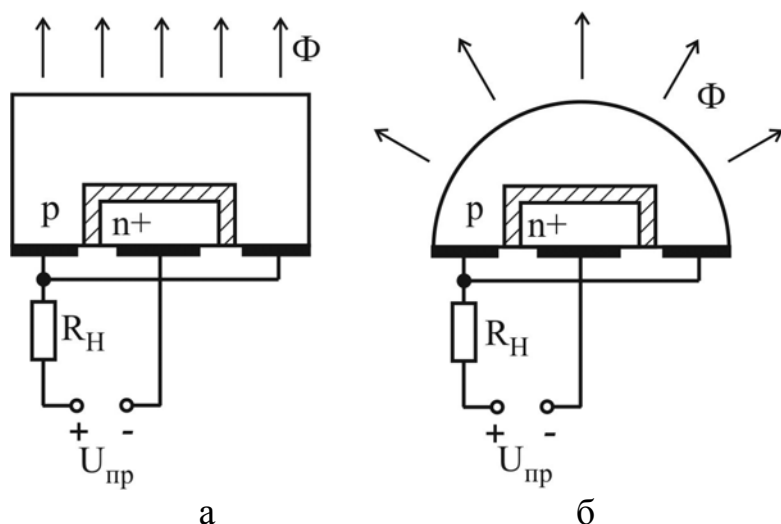


Рис. 6.1

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 p-n-перехода оказывается большим по сравнению с током инжекции, особенно при малых прямых напряжениях, процесс рекомбинации в этом случае реализуется в основном в p-n-переходе.

Излучательная способность светодиода характеризуется:

- *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;

- *внешней квантовой эффективностью* излучения (квантовым выходом), определяемой отношением числа фотонов, испускаемых диодом во внешнее пространство, к числу инжектируемых носителей через p-n-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

(см. рис. 6.1, а, б): полусферы, отражающие металлизированные поверхности и другие, у которых практически отсутствует полное внутреннее отражение.

Основными характеристиками светодиодов являются: ВАХ, яркостная, спектральная. На рис. 6.2, а 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 p-n-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 p-n-переход (рис. 6.2, б).

Спектральная характеристика – зависимость интенсивности излучения от длины волны излучаемого света или от энергии излучаемых квантов (рис. 6.2, в). 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.

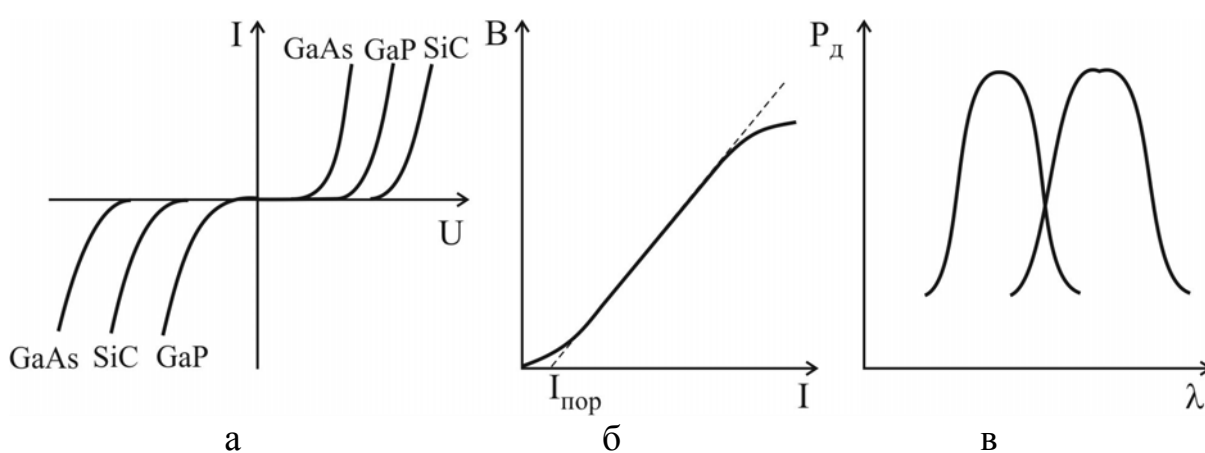


Рис. 6.2

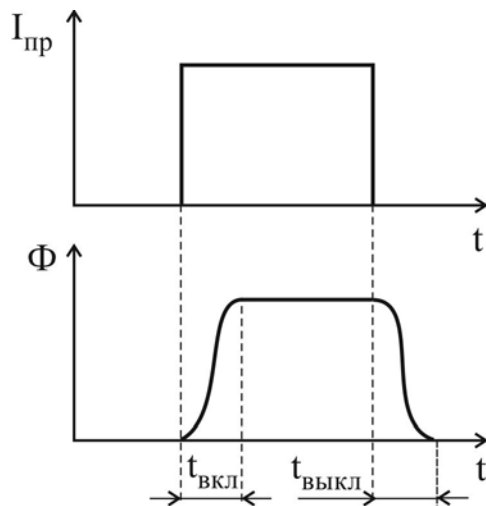
Параметры светодиодов. *Сила света* I_v – световой поток, приходящийся на единицу телесного угла в заданном направлении, выражается в канделах (кд) и составляет десятые доли – единицы милликандел. Кандела есть единица силы света, испускаемого специальным стандартным источником.

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).

Быстродействие излучающего диода определяется инерционностью возникновения излучения при подаче прямоугольного импульса прямого тока (рис. 6.3).

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

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.

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 – концентрация 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, concentra-

ция 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. 6.4, а). 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. 6.4, б).

Спектральная характеристика фоторезистора – зависимость чувствительности от длины волны падающего светового потока (рис. 6.4, в).

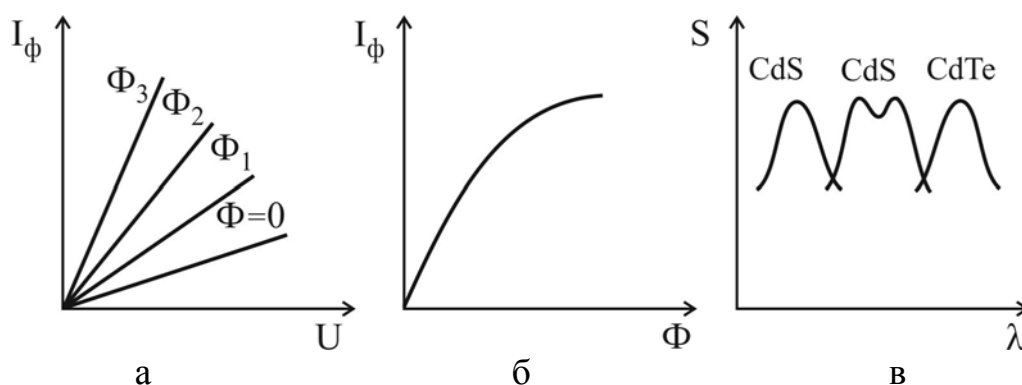


Рис. 6.4

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:

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

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 $f_{гр} = 10^3 \dots 10^5 \text{ Гц}$;

– *температурный коэффициент фототока* – коэффициент, показывающий изменение фототока при изменении температуры и постоянном световом потоке:

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

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 в корпусе, через которое поступает свет, и защищен от воздействия света с другой стороны.

Фотодиоды могут работать в одном из двух режимов: *вентильном, фотогенераторном, или фотогальваническом*, – без внешнего источника электрической энергии; *фотодиодном, или фотопреобразовательном, режиме* – с внешним источником электрической энергии.

Схема включения фотодиода в вентильном режиме представлена на рис. 6.5. При отсутствии светового потока на границе р-п-перехода создается контактная разность потенциалов. Через переход навстречу друг другу протекают два тока $I_{\text{диф}}$ и $I_{\text{др}}$, которые уравниваются 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 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_Φ . Дрейф неосновных но-

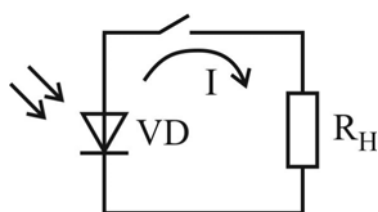


Рис. 6.5

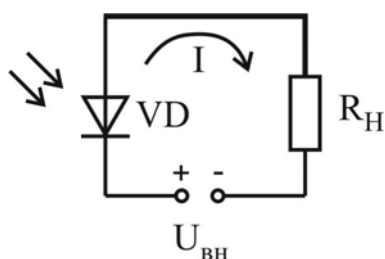


Рис. 6.6

сителей 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, используются в качестве источников напряжения, преобразующих энергию солнечного излучения в электрическую.

В фотодиодном, или фотопреобразовательном, режиме работы последовательно с фотодиодом включается внешний источник энергии, смещающий диод в обратном направлении (рис. 6.6). 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. 6.7). 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 фотovoltaическом режиме, т. е. фотодиод становится источником электрической энергии. Квадрант I – это нерабочая область для фотодиода, в этом квадранте р-п-переход смещен в прямом направлении.

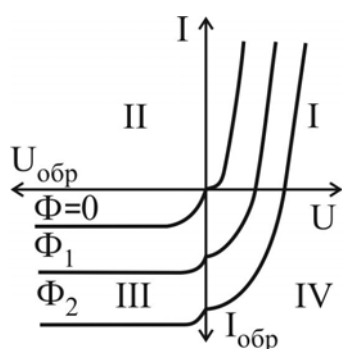


Рис. 6.7

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* $f_{\text{гр}}$ лежит в диапазоне $f_{\text{гр}} = 10^6 \dots 10^{12}$ Гц.

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

Фототранзисторы, как и обычные транзисторы, могут иметь р-п-р- и п-р-п-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 БТ, работающий в активном режиме, т. е. эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный – в обратном (рис. 6.8, а). Однако он может работать и с отключенным выводом базы (рис. 6.8, 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:

$$I_T = I_{k0} / (1 - \alpha).$$

ВАХ аналогичны выходным характеристикам БТ, включенного по схеме с ОЭ, где параметром является не ток базы, а световой поток, или фототок, при $I_b = \text{const}$ (рис. 6.8, в). Энергетические и спектральные характеристики такие же, как у фотодиода.

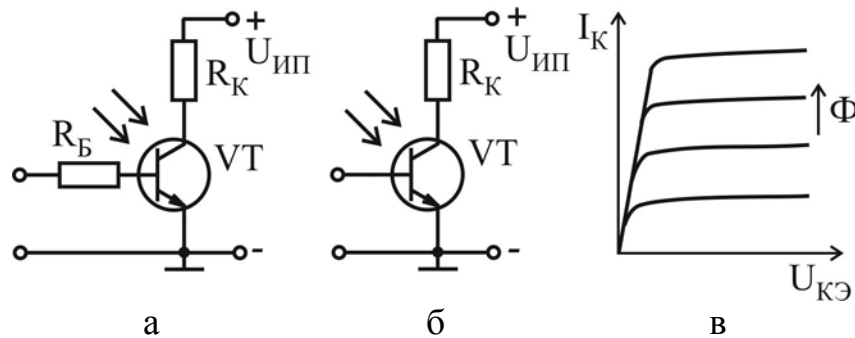


Рис. 6.8

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 фототока* $K_{y\Phi} = (1 + h_{21\Phi})$, 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 $(1 + h_{21\Phi})$ раз выше по сравнению с чувствительностью эквивалентного диода.

Оптопара – оптоэлектронный полупроводниковый прибор, содержащий источник и приемник оптического излучения, оптически и конструктивно связанные между собой, и предназначенный для выполнения различных функциональных преобразований электрических и оптических сигналов. В интегральных опто-

электронных схемах источником оптического излучения является инжекционный светодиод, обеспечивающий высокое быстродействие оптопары. Фотоприемниками могут быть фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры. Сочетание в одном конструктивном элементе светодиода с одним из этих фотоприемников позволило создать ряд оптопар с различными характеристиками: резисторных, диодных, транзисторных, тиристорных, УГО которых представлены на рис. 6.9, а, б, в, г соответственно.

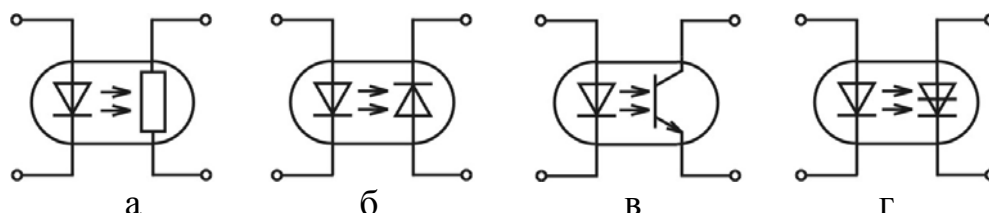


Рис. 6.9

Принцип действия оптопар основан на двойном преобразовании энергии. В источниках излучения энергия электрического сигнала преобразуется в оптическое излучение, а в фотоприемниках оптический сигнал преобразуется в электрический сигнал (ток или напряжение). Оптопара представляет собой прибор с электрическими входными и выходными сигналами.

Резисторные оптопары наиболее универсальны. Могут использоваться в аналоговых и ключевых устройствах, имеют широкий диапазон изменения сопротивления (десятки – сотни мегаом в неосвещенном и сотни ом в освещенном состояниях), низкий частотный диапазон.

Диодные оптопары используются в качестве ключа и могут коммутировать ток с частотой $10^6 \dots 10^7$ Гц. Темновое сопротивление достигает $10^8 \dots 10^{10}$ Ом, а при освещении снижается до сотен ом. Сопротивление между входной и выходной цепями $10^{13} \dots 10^{15}$ Ом.

Транзисторные оптопары имеют большую чувствительность, чем диодные. Быстродействие не превышает 10^5 Гц.

Тиристорные оптопары применяются в ключевых режимах для формирования и коммутации мощных импульсов.

Наиболее распространенные на практике оптопары можно описать, используя следующие параметры: входные параметры (параметры излучателя), выходные параметры (параметры фотоприемника), передаточные параметры (параметры передачи сигнала с входа на выход), параметры изоляции.

Основными параметрами для входной цепи оптопар являются:

- *номинальный входной ток* $I_{\text{вх ном}}$ – значение тока, рекомендуемое для оптимальной эксплуатации оптопары, а также для снятия ее основных параметров;
- *входное напряжение* $U_{\text{вх}}$ – падение напряжения на излучательном диоде при протекании номинального входного тока $I_{\text{вх ном}}$;

– *входная емкость* $C_{\text{вх}}$ – емкость между входными выводами оптопары в номинальном режиме;

– *максимальный входной ток* $I_{\text{вх max}}$ – максимальное значение постоянного прямого тока, при котором сохраняется работоспособность оптопары;

– *обратное входное напряжение* $U_{\text{вх обр}}$ – максимальное значение обратного напряжения любой формы (постоянное, импульсное, синусоидальное и др.), которое длительно выдерживает излучательный диод без нарушения нормальной работы.

Выходными параметрами оптопары являются:

– *максимально допустимое обратное выходное напряжение* $U_{\text{вых обр max}}$ – максимальное значение обратного напряжения любой формы, которое выдерживает фотоприемник без нарушения нормальной работы

– *максимально допустимый выходной ток* $I_{\text{вых max}}$ – максимальное значение тока, протекающего через фотоприемник во включенном состоянии оптопары;

– *ток утечки на выходе* (темновой ток) $I_{\text{т}}$ – ток на выходе оптопары при $I_{\text{вх}} = 0$, заданном значении и полярности $U_{\text{вых}}$;

– *выходное остаточное напряжение* (напряжение насыщения) $U_{\text{ост}}$ – значение напряжения на включенном фоторезисторе или фототиристоре в режиме насыщения;

– *выходная емкость* $C_{\text{вых}}$ – емкость на зажимах фотоприемника.

Эффективность передачи электрических сигналов со входа на выход оптрона определяется *коэффициентом передачи по току* K_i , т. е. отношением 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 $K_{\text{ид}} = dI_{\text{вых}} / dI_{\text{вх}}$.

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

6.2. Порядок выполнения работы

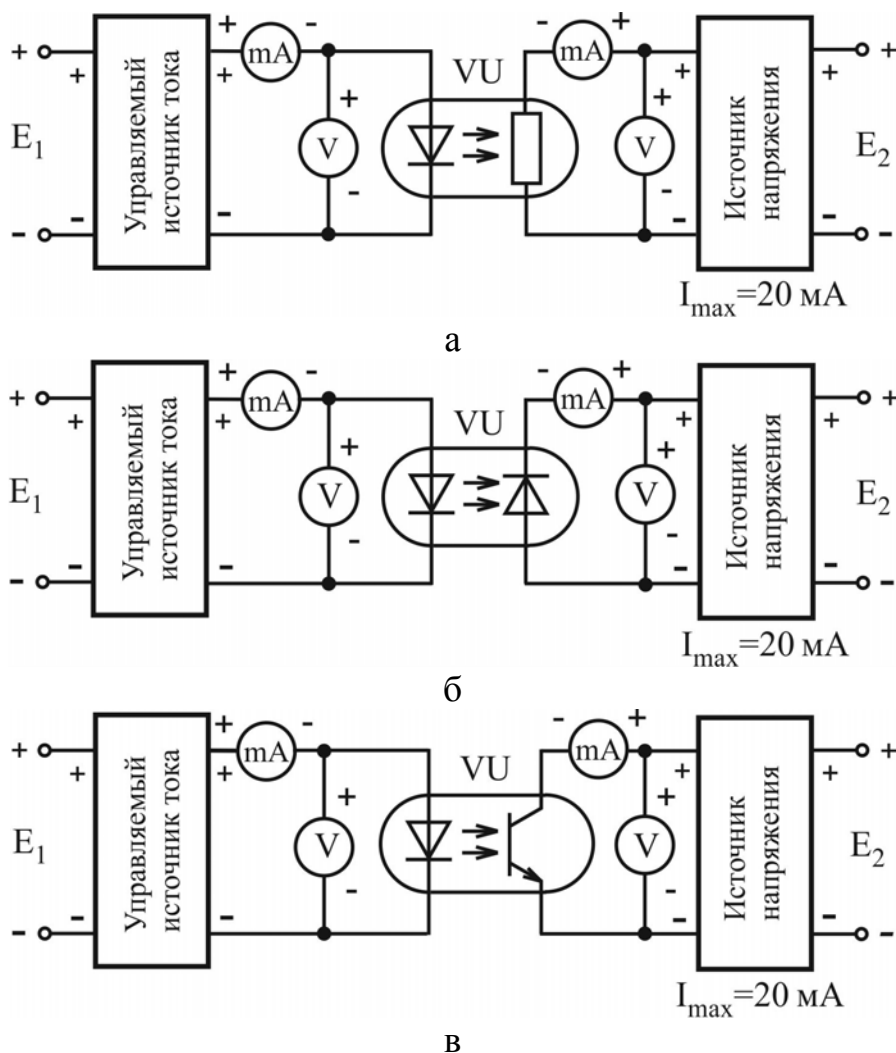
1. Тип исследуемой оптопары приведен в карточке задания. Используя паспортные данные прибора, определить область допустимых режимов работы фотоизлучателя и фотоприемника, входящих в состав оптопары. **Внимание! Для предотвращения электрического повреждения прибора измерения проводить только в области допустимых режимов работы.**

2. Собрать схему для исследования ВАХ предложенной оптопары, изображенную на рис. 6.10, а для диодно-резисторной, на рис. 6.10, б – для диодной, на рис. 6.10, в – для диодно-транзисторной.

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



6.3. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Паспортные данные исследованных приборов.
3. Принципиальная схема установки для исследования ВАХ оптопары.
4. Результаты экспериментальных исследований в виде таблиц и графиков.
5. Выводы.

6.4. 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 действия, характеристики и параметры фотоприемников: фоторезисторов, фотодиодов, фототранзисторов.
5. Принцип действия оптопар, разновидности оптопар.
6. Параметры оптопар.