

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

ЭЛЕМЕНТЫ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

Учебное пособие

Составители:
Е.В. Богатиков,
Т.Г. Меньшикова

Издательско-полиграфический центр
Воронежского государственного университета
2010

Утверждено научно-методическим советом физического факультета
17 декабря 2009 г., протокол № 12

Рецензент канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики твердого
тела и наноструктур ВГУ В.М. Кашкаров

Учебное пособие подготовлено на кафедре физики полупроводников
и микроэлектроники Воронежского государственного университета.

Рекомендуется для выполнения лабораторных работ и для самостоя-
тельной работы студентов 3 курса дневного отделения физического
факультета ВГУ, обучающихся по программе среднего профессио-
нального образования.

Для специальности 210104 – Микроэлектроника и твердотельная
электроника

СОДЕРЖАНИЕ

Механизм излучения света в полупроводниках	4
Вольт-амперная характеристика р-п перехода	7
Лабораторная работа № 1. Светоизлучающие диоды	9
Лабораторная работа № 2. Фоторезисторы	14
Лабораторная работа № 3. Фотодиоды	20
Лабораторная работа № 4. Оптопары	24
Список литературы	30

МЕХАНИЗМ ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕТА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Оптические свойства полупроводника определяются, прежде всего, его зонной структурой. Зонная структура – это расположение энергетических уровней электронов в кристалле. В изолированных атомах энергетические уровни (т. е. значения энергии, которые может принимать электрон, принадлежащий атому) расположены дискретно – между отдельными уровнями существуют достаточно большие запрещенные интервалы энергий. На каждом уровне могут находиться только два электрона с различным значением спина (рис. 1, область I). Таким образом, выполняется правило: в атоме не могут существовать два электрона с одинаковым значением энергии и одинаковым спином. При сближении атомов и объединении их в кристалл это правило сохраняется – в кристалле все электроны имеют различную энергию. Это возможно благодаря тому, что при взаимодействии двух атомов происходит смещение энергетических уровней (рис. 1, область II) – вместо двух одинаковых уровней энергии образуется два рядом расположенных уровня. В итоге, зонная структура кристалла образована разрешенными и запрещенными зонами. В пределах разрешенных зон расположены близлежащие энергетические уровни.

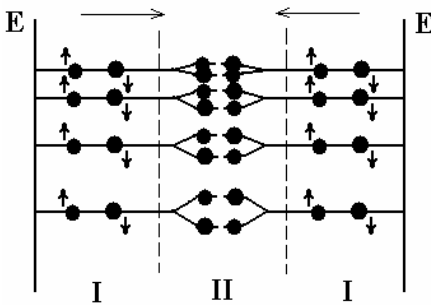


Рис. 1. Образование энергетических уровней: I – энергетические уровни изолированных атомов, II – энергетические уровни связанных атомов

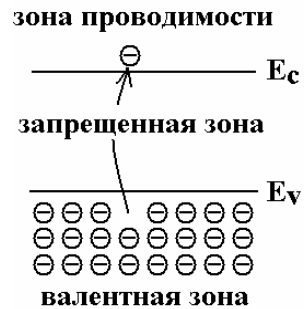


Рис. 2. Зонная структура полупроводников

В полупроводниках и диэлектриках зонная структура упрощенно представлена на рис. 2. Последнюю разрешенную зону (зону с максимальным значением энергии), на которой располагаются электроны, называют валентной зоной (так как в ней расположены валентные электроны). Эта зона в полупроводниках и диэлектриках заполнена полностью. Для того чтобы электроны могли перемещаться в кристалле (т. е. изменять свою энергию), они должны преодолеть запрещенную зону и попасть в первую свободную разрешенную зону – зону проводимости. Потолок валентной зоны обозначается E_v , а дно зоны проводимости – E_c .

Основными параметрами полупроводника является ширина запрещенной зоны, т. е. расстояние между E_v и E_c , а также тип проводимости и количество легирующей примеси. В чистых полупроводниках при переходе электрона из валентной зоны в зону проводимости образуется пара носителей заряда, участвующих в электропроводности – электрон в зоне проводимости и дырка (оборванная химическая связь) в валентной зоне. Для того, чтобы увеличить количество носителей n - или p -типа, вводят донорную или акцепторную примесь, соответственно. У атомов донорной примеси количество валентных электронов больше, чем у полупроводника и, если локальный энергетический уровень примеси (локальный, потому что этот уровень имеется только в тех точках кристалла, где располагаются атомы примеси) находится вблизи дна зоны проводимости, электроны примеси легко могут переходить в зону проводимости (рис. 3а). Атомы акцепторной примеси, напротив, имеют меньше электронов, чем атомы полупроводника, и могут захватывать на свои локальные уровни электроны, что приводит к образованию в валентной зоне дырок (рис. 3б).

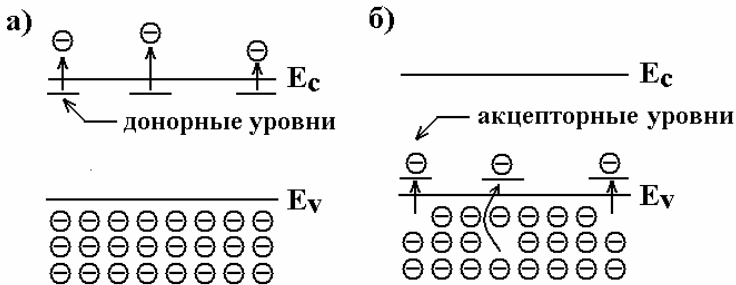


Рис. 3. Зонная структура легированных полупроводников: (а) – полупроводник n -типа; (б) – полупроводник p -типа

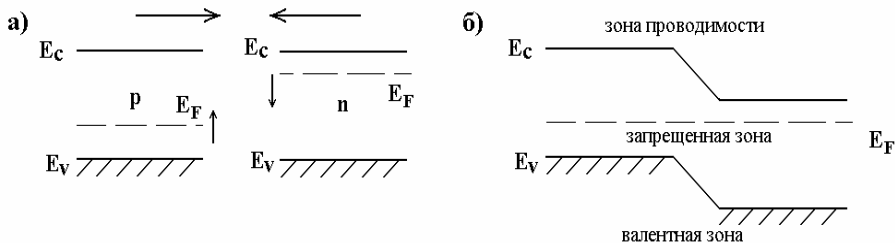


Рис. 4. Образование p - n -перехода: (а) – зонная диаграмма изолированных полупроводников n - и p -типа; (б) – зонная диаграмма p - n -перехода

На границе контакта n - и p -областей полупроводника энергетические зоны смещаются таким образом, чтобы положение уровня Ферми E_F (энергетического уровня, вероятность заполнения которого равна $1/2$) в обеих областях совпало (рис. 4а, б). Напряжение, приложенное к p - n -переходу, смещает энергетические уровни: положительное напряжение смещает уровни вверх, а отрицательное – вниз.

Переход электрона из валентной зоны в зону проводимости называется генерацией, а переход электрона из зоны проводимости в валентную зону называется рекомбинацией. При генерации носителей заряда поглощается энергия, а при рекомбинации энергия выделяется. Энергия может выделяться либо в виде света (излучательная рекомбинация), либо в виде тепла (безызлучательная рекомбинация). Для большинства полупроводников вероятность излучательной рекомбинации намного меньше, чем безызлучательной. Это объясняется следующей причиной. Реальная структура энергетических зон имеет сложный характер и положение E_c и E_v зависит от волнового числа электрона k (который связан с импульсом электрона) – рис. 5. Различают полупроводники, у которых положение дна зоны проводимости совпадает с положением потолка валентной зоны – прямозонные полупроводники (например, GaAs), и полупроводники, у которых эти точки соответствуют различным значениям волнового вектора электронов – непрямозонные материалы (Ge, Si). При рекомбинации электрон должен отдать не только энергию, но и импульс. Поскольку фотон имеет очень маленький импульс, необходимо, чтобы в процессе излучательной рекомбинации в непрямозонных материалах участвовала третья частица, что существенно снижает вероятность излучательной рекомбинации.

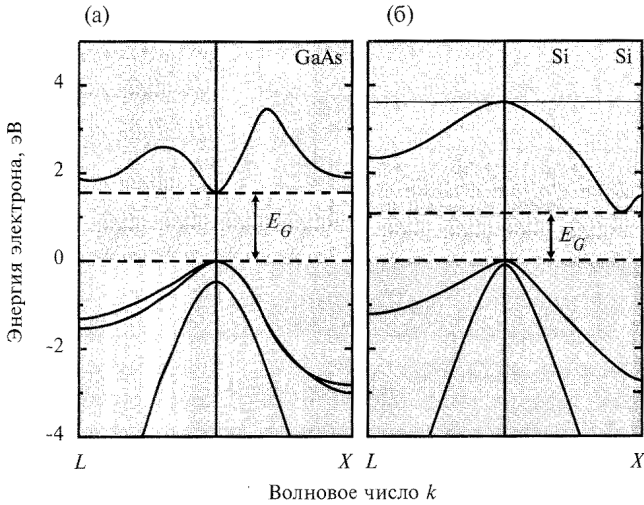


Рис. 5. Зонная структура прямозонных (а) и непрямозонных (б) полупроводников

Вольт-амперная характеристика p-n перехода

Идеализированная ВАХ p-n-перехода описывается следующим уравнением (рис. 6):

$$I = I_0(e^{U/\phi_T} - 1),$$

где ток I_0 называют тепловым током. Он определяет величину обратного тока идеальной ВАХ, так как при $U < 0$ $e^{U/\phi_T} \rightarrow 0$ и $I \rightarrow -I_0$.

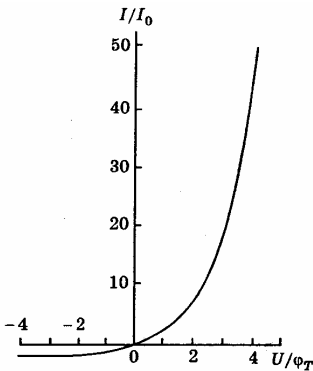


Рис. 6. Идеализированная ВАХ p-n перехода

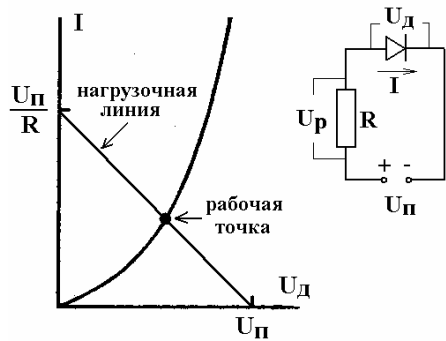


Рис. 7. Построение нагрузочной линии

Режим работы оптоэлектронного прибора определяется при помощи так называемой нагрузочной линии. На выходе любого прибора всегда имеется некоторое сопротивление нагрузки. Это или специально предназначенный для этого нагрузочный резистор, или следующий прибор, подключенный к выходу данного оптоэлектронного устройства. Для определения режима работы оптоэлектронного прибора на одном графике строят выходную характеристику рассматриваемого прибора (т. е. график, по оси x которого отложено выходное напряжение, а по оси y – выходной ток) и ВАХ нагрузочного резистора. Следует обратить внимание, что ВАХ нагрузочного резистора строится не в координатах «падение напряжения на резисторе» – «ток через резистор», а в координатах «выходное напряжение оптоэлектронного прибора» – «ток через резистор». Пересечение нагрузочной линии (т. е. ВАХ нагрузочного резистора) и ВАХ оптоэлектронного прибора называется рабочей точкой и определяет режим работы прибора при данном сопротивлении нагрузки.

Для того, чтобы построить нагрузочную линию, рассмотрим схему, которая содержит последовательно включенные источник питания с напряжением U_{Π} , нагрузочное сопротивление R , на котором падает напряжение U_P и оптоэлектронный прибор, на котором падает напряжение U_D (рис. 7). Через все элементы схемы течет одинаковый ток I . Так как напряжение питания в данной схеме распределяется между резистором и оптоэлектронным прибором, можно записать:

$$U_{\Pi} = U_P + U_D.$$

Согласно закону Ома, падение напряжения на резисторе равно. $U_P = I \cdot R$. Тогда $U_{\Pi} = I \cdot R + U_D$, откуда получаем выражение для ВАХ резистора в координатах $I - U_D$:

$$I = \frac{U_{\Pi}}{R} + \frac{1}{R} \cdot U_D.$$

Полученное уравнение прямой линии строится по двум точкам пересечения с осями координат: при $U_D = 0$ $I = \frac{U_{\Pi}}{R}$, при $I = 0$ $U_D = U_P$.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ ДИОДЫ

Цель работы: изучение физических принципов генерации излучения в светоизлучающих диодах (СИД), схемы включения светодиодов, вольтамперных характеристик светодиодов.

Светодиод – это излучающий полупроводниковый прибор с одним *p-n*- переходом, преобразующий электрическую энергию в энергию некогерентного светового излучения.

Физической основой полупроводниковых излучателей является люминесценция, включающая в себя два основных этапа: генерацию носителей заряда (например, при подаче прямого напряжения на светодиод) и рекомбинацию. Выделяющаяся при этом энергия превращается либо в оптическое излучение, либо в теплоту (рис. 8). Наиболее эффективное превращение энергии в оптическое излучение происходит в прямозонных полупроводниках (полупроводники, у которых дно зоны проводимости расположено над потолком валентной зоны). Генерации света способствует также введение нейтральной примеси – кислорода или азота, которая образует центры рекомбинации.

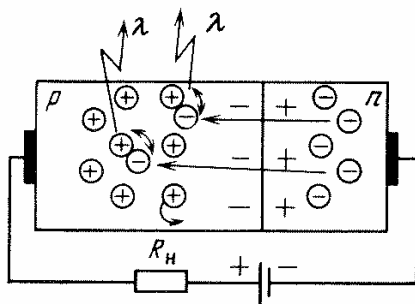


Рис. 8. Механизм излучения света в светоизлучающем диоде

Длина волны фотонов, излучаемых при рекомбинации, определяется соотношением

$$\lambda \approx 1,24 / E_3,$$

где λ – длина волны в микронметрах; E_3 – ширина запрещенной зоны полупроводника в электрон-вольтах. Для работы в диапазоне видимого излучения (0,38–0,78 мкм) необходимы полупроводники с шириной запрещенной зоны 1,5–3,0 эВ. Поэтому основные материалы

полупроводниковых излучателей – это соединения $A^{III}B^V$: GaP, GaAs, а также твердые растворы на их основе.

Светодиодная структура представляет собой электронно-дырочный переход, в котором одна из областей является эмиттерной, т. е. инжектирующей основные носители заряда (в данном случае – это n -область), а другая (в данном случае – p -область) – базовой. При приложении прямого напряжения потенциальный барьер понижается и начинается инжекция неосновных носителей: дырок – в n -область и электронов – в p -область. Инжектированные неосновные носители рекомбинируют вблизи p - n перехода, обеспечивая генерацию оптического излучения. Обычно излучающей является область только по одну сторону p - n перехода. Для того, чтобы количество инжектированных носителей было максимально именно в активной области, в неактивную область вводят больше примеси. В результате, в излучающей структуре инжекция практически односторонняя.

Зависимость параметров излучения от длины волны называется спектральной характеристикой излучающего диода. Длина волны излучения определяется разностью двух энергетических уровней, между которыми происходит переход электронов при люминесценции. Так как рекомбинация обычно происходит не только между дном зоны проводимости и потолком валентной зоны, а между двумя группами энергетических уровней, лежащими в зоне проводимости и в валентной зоне, то спектр излучения оказывается размытым. Примеры спектральных характеристик приведены на рис. 9.

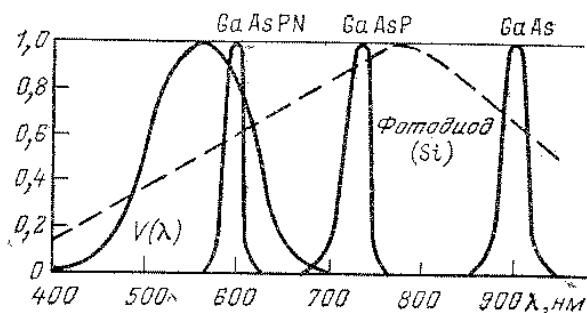


Рис. 9. Спектральные характеристики глаза, светодиода и фотодиода

Параметры светодиода как элемента электрической цепи определяются его ВАХ (рис. 10). Различия прямых ветвей ВАХ светодиодов, излучающих свет с разной длиной волны, связаны с различием ширины запрещенной зоны применяемых материалов. Чем меньше длина волны излучения, тем больше ширина запрещенной зоны и больше прямое падение напряжения на излучающем диоде и потери электрической энергии в нем. Обратные ветви ВАХ имеют малое допустимое обратное напряжение, так как ширина p - n перехода в излучающих диодах незначительна. При работе в схеме с большими обратными напряжениями последовательно со светодиодом необходимо включать обычный диод, имеющий достаточное значение допустимого обратного напряжения.

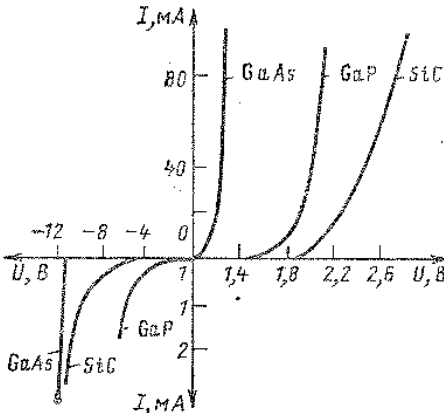


Рис. 10. ВАХ светодиодов

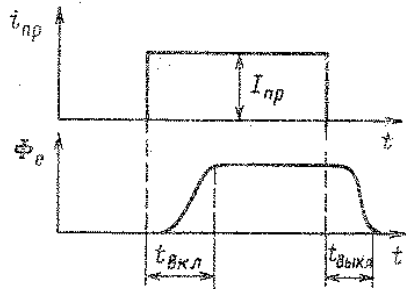


Рис. 11. Диаграмма переключения СИД

Быстродействие излучающего диода определяется инерционностью возникновения излучения при подаче прямоугольного импульса прямого тока (рис. 11). Время переключения $t_{пер}$ складывается из времени включения $t_{вкл}$ и выключения $t_{выкл}$ излучения. Инерционность светодиода определяется процессом перезарядки барьерной емкости p - n -перехода и процессами накопления и рассасывания неосновных носителей в активной области диода.

Важной особенностью светодиодов является присущая им деградация – постоянное уменьшение мощности излучения при длительном протекании через прибор прямого тока. Деградацию связы-

вают с увеличением концентрации центров безызлучательной рекомбинации за счет перемещения в электрическом поле неконтролируемых примесных атомов. Также играет роль дезактивация части излучательных центров за счет их перехода из узлов кристаллической решетки в междоузлия.

Простейшая схема включения светодиода – схема с токоограничивающим резистором (рис. 7). В этом случае рабочий режим светодиода определяется пересечением ВАХ и нагрузочной линии в соответствии с соотношением

$$I_{np} = (U_{\Pi} - U_{np}) / R,$$

где U_{Π} – напряжение источника питания, I_{np} , U_{np} – прямой ток через светодиод и прямое падение напряжения на нем, R – сопротивление токоограничивающего резистора.

Необходимость применения токоограничивающего резистора объясняется сильной нелинейностью ВАХ светодиода. Ток, протекающий через светодиод, не должен превышать 10–50 мА. Превышение оптимальной силы тока существенно сокращает срок службы светодиода. При отсутствии токоограничивающего резистора необходимо с высокой точностью задавать напряжение питания, так как из-за нелинейного характера ВАХ небольшие изменения прямого напряжения на светодиоде приводят к существенному изменению тока, протекающего через светодиод.

Порядок выполнения работы

1. Подключить источник напряжения к клеммам 1 и 5 (рис. 12).
2. К клеммам 1 и 2 подключить амперметр, измеряющий силу тока, протекающего через светодиод 6 (амперметр включается в цепь последовательно).
3. К клеммам 2 и 3 подключить вольтметр, измеряющий падение напряжения на светодиоде (вольтметр включается в цепь параллельно).
4. Включить источник напряжения, установив напряжение питания 5 В.
5. Изменяя сопротивление переменного резистора 4, получить значения тока, протекающего через светодиод, равные 1 мА, 2,5 мА, 5 мА, 10 мА, 15 мА, 20 мА, 25 мА. Измерить падение напряжения на светодиоде при данных значениях тока.
6. По полученным данным построить ВАХ светодиодов.

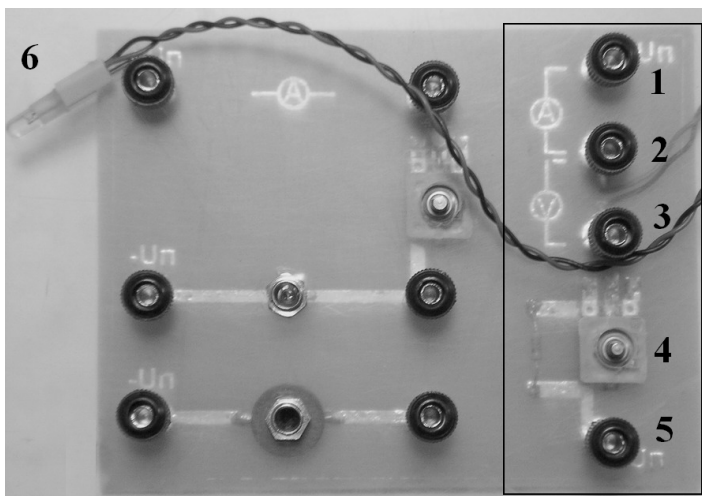


Рис. 12. Схема макета для измерения ВАХ светодиода

Содержание отчета

1. Основные закономерности работы СИД.
2. Результаты измерений представить в виде табл. 1.

Т а б л и ц а 1

ИК СИД, $\lambda=900$ нм		Красный СИД, $\lambda=660$ нм		Желтый СИД, $\lambda=590$ нм		Зеленый СИД, $\lambda=565$ нм		Синий СИД, $\lambda=470$ нм	
I, мА	U, В	I, мА	U, В	I, мА	U, В	I, мА	U, В	I, мА	U, В

3. ВАХ светодиодов, построенные на одном графике.
4. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Какие полупроводниковые материалы используют для изготовления светодиодов и почему?
2. Для чего неактивная область светодиода имеет более высокий уровень легирования по сравнению с активной областью?
3. Почему светодиод излучает некогерентный свет?
4. Чем вызвано различие рабочего напряжения светодиодов, излучающих свет с разной длиной волны?
5. Почему при включении светодиода необходимо использовать токоограничивающий резистор?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. ФОТОРЕЗИСТОРЫ

Цель работы: изучение основных физических закономерностей, определяющих свойства и параметры фоторезисторов, исследование вольтамперных и световых характеристик фоторезисторов.

Фоторезисторами называют полупроводниковые приборы, проводимость которых изменяется под действием света. Изменение сопротивления обусловлено образованием дополнительных свободных носителей в полупроводнике – внутренним фотоэффектом.

Основным элементом фоторезистора является тонкий слой полупроводникового материала, помещенного на изолирующую подложку. На краевые области полупроводника напыляют металлические контакты (рис. 13).

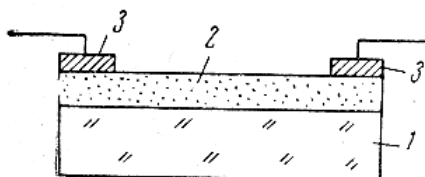


Рис. 13. Схематическое изображение фоторезистора

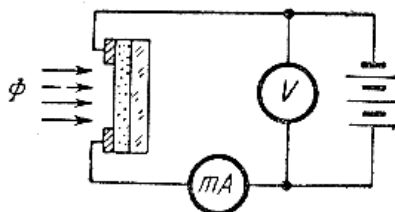


Рис. 14. Схема включения для измерения параметров фоторезистора

Если фоторезистор включен последовательно с источником напряжения (рис. 14) и не освещен, то в его цепи протекает темновой ток:

$$I_T = B\sigma_0 U,$$

где B – постоянный коэффициент, определяемый только геометрическими размерами фоточувствительного слоя; $\sigma_0 = e\mu_p p_0 + e\mu_n n_0$ – темновая электропроводность полупроводника (μ_n, μ_p – подвижности электронов и дырок).

При освещении фоторезистора проводимость светочувствительного слоя возрастает и через прибор протекает световой ток:

$$I_c = B\sigma U,$$

где $\sigma = \sigma_0 + (e\mu_p \Delta p + e\mu_n \Delta n)$ – электропроводность материала при освещении; $\Delta n, \Delta p$ – концентрация неравновесных электронов и дырок, образовавшихся в результате внутреннего фотоэффекта.

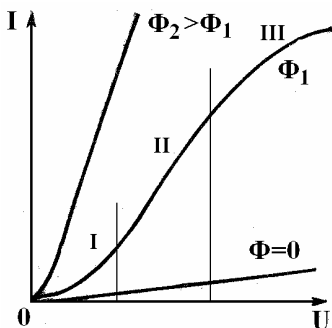


Рис. 15. ВАХ фоторезистора

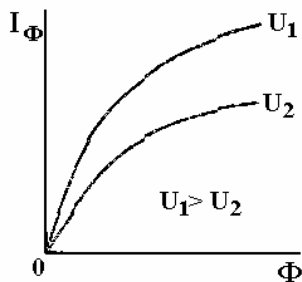


Рис. 16. Световые характеристики фоторезистора

Параметром ВАХ фоторезистора служит световой поток, который определяет сопротивление фоторезистора. При малом напряжении ВАХ близка к квадратичной (рис. 15, область I). При достаточно большом напряжении ВАХ практически линейна (рис. 15, область II), но в ограниченной области.

Световая характеристика фоторезистора $I_\phi = f(\Phi)$ (зависимость фототока $I_\phi = I_C - I_T$ от светового потока Φ , падающего на прибор) имеет нелинейный характер (рис. 16), которую в общем случае можно представить в виде:

$$I_\phi = AU\Phi^a,$$

где A , a – некоторые константы, $0 < a < 1$ (типичное значение $a = 1/2$). Замедление скорости роста фототока при увеличении светового потока происходит потому, что с ростом концентрации неравновесных носителей возрастает вероятность их рекомбинации и уменьшается время жизни.

Существенное значение при использовании фоторезисторов имеют их частотные характеристики. При включении и выключении света фототок возрастает до максимума не мгновенно. Характер и длительность кривых нарастания и спада фототока во времени существенно зависят от механизма рекомбинации неравновесных носителей в данном материале, а также от величины интенсивности света. При малом уровне инжекции нарастание и спад фототока происходит по закону:

$$i_\phi = I_\phi e^{-t/\tau},$$

где τ – время жизни носителей в полупроводнике, I_ϕ – стационарное значение фототока. Фоторезисторам свойственна значительная инерционность. Их чувствительность заметно уменьшается на частоте 100–1000 Гц.

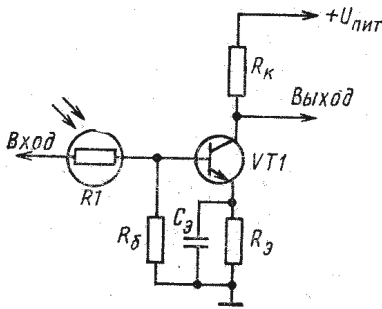


Рис. 17. Схема включения фоторезистора

Поскольку сила тока, протекающего через фоторезистор, невелика, его применяют совместно с усилителями. На рис. 17 показано, как с помощью фоторезистора можно управлять режимом работы транзистора.

Таблица 2

Основные параметры фоторезисторов

Фото-резистор	Рабочее напряжение U_p , В, не более	Темновое сопротивление, R_T , МОм, не менее	Темновой ток I_T , мкА, не более	Общий ток $I_{общ}$ при $E = 200$ лк, мА, не менее	Отношение темнового сопротивления к световому, не менее
ФСК-6	50	3.3	15	1,5	100
ФСД-1	20	2	10	1,5	150
ФСА-1	2 ... 50	0,02 ... 1			1,2
СФ4-1А	2,5 ... 10	1			

В качестве полупроводникового материала в фоторезисторах обычно используют: в видимой области оптического диапазона – сульфид кадмия CdS (фоторезисторы ФСК, СФ2, ФПФ), для видимого и ИК диапазона – селенид кадмия CdSe (фоторезисторы ФСД, СФ3), в ИК-диапазоне с длинами волн 1 ... 5 мкм – сульфид свинца PbS (фоторезисторы ФСА) и селенид свинца PbSe (фоторезисторы СФ4). На рис. 18 приведены спектральные характеристики фоторезисторов. В табл. 2 представлены характеристики некоторых фоторезисторов.

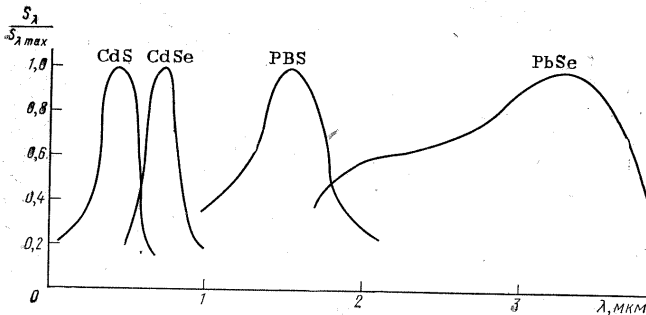


Рис. 18. Спектральные характеристики материалов фоторезисторов

Приборы, используемые в работе

Лабораторный макет, 2 источника напряжения, 2 амперметра, вольтметр.

Описание лабораторной установки

Для питания светодиода 1 к клеммам 7, 11 подключается источник напряжения (рис. 19). Миллиамперметр (до 200 мА), измеряющий ток, протекающий через светодиод, подключается к клеммам 7, 8. Для изменения напряжения на светодиоде служит переменный резистор 10 номиналом до 1,5 кОм. Источник напряжения, подаваемого на фоторезистор ФСД-1, подключается к клеммам 1, 6. Микроамперметр (до 2000 мкА) для измерения тока, протекающего через фоторезистор 5, подключается к клеммам 1, 3. Вольтметр, измеряющий напряжение на фоторезисторе, подключается к клеммам 4, 6. Клеммы 3 и 4 соединяются переключателем.

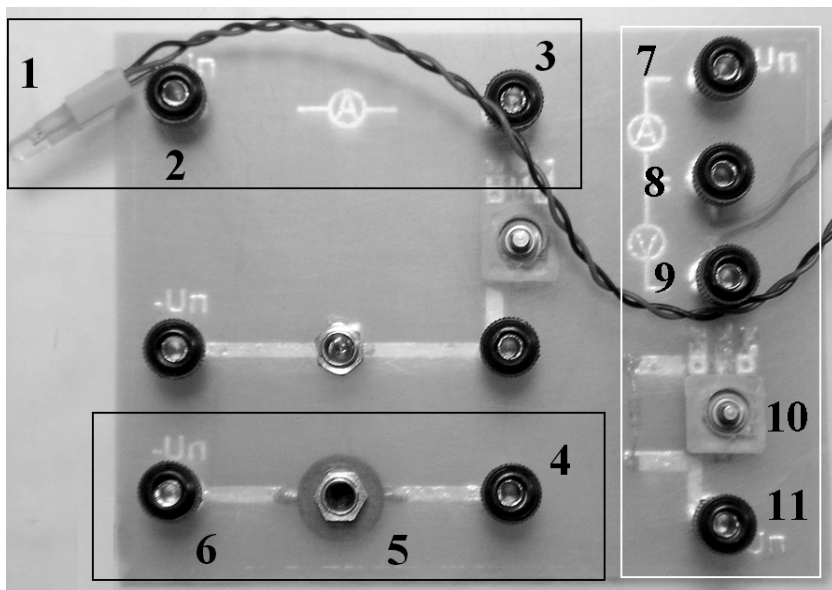


Рис. 19. Лабораторный макет для исследования вольтамперных, световых и спектральных характеристик фоторезисторов

Порядок выполнения работы

1. Подключить к макету источники напряжения и измерительные приборы.

2. Определить световые характеристики фоторезистора ФСД-1, используя синий, зеленый, желтый и красный светодиоды и задавая ток, протекающий через светодиоды, равный 1, 2,5, 5, 10, 15, 20, 25 мА. Построить зависимости $I(\Phi)$, считая, что световой поток светодиодов линейно зависит от силы тока, протекающего через светодиод.

3. Получить вольтамперные характеристики фоторезистора ФСД-1, используя светодиод, соответствующий максимальной спектральной чувствительности фоторезистора ФСД-1 (задавать следующие напряжения на фоторезисторе: 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1, 3, 5, 7, 9 В, ток через светодиод $I_{\text{Сид}} = 20$ мА).

Содержание отчета

1. Принцип работы фоторезистора.
2. Результаты измерений представить в виде табл. 3, 4.

Т а б л и ц а 3

Световые характеристики фоторезистора ФСД-1

ИК СИД, $\lambda = 900$ нм		Красный СИД, $\lambda = 660$ нм		Желтый СИД, $\lambda = 590$ нм		Зеленый СИД, $\lambda = 565$ нм		Синий СИД, $\lambda = 470$ нм	
$I_{\text{Сид}}$, мА	$I_{\text{ФСД1}}$, мкА	$I_{\text{Сид}}$, мА	$I_{\text{ФСД1}}$, мкА	$I_{\text{Сид}}$, мА	$I_{\text{ФСД1}}$, мкА	$I_{\text{Сид}}$, мА	$I_{\text{ФСД1}}$, мкА	$I_{\text{Сид}}$, мА	$I_{\text{ФСД1}}$, мкА

Т а б л и ц а 4

ВАХ фоторезистора ФСД-1

$U_{\text{ФСД1}}$	$I_{\text{ФСД1}} _{I_{\text{Сид}} = 20 \text{ мА}}$

3. Графики световой характеристики фоторезистора ФСД-1 $I_{\text{ФСД1}}(I_{\text{Сид}})$, построенные по табл. 3.

4. График спектральной чувствительности фоторезистора ФСД-1 $I_{\text{ФСД1}}(\lambda)|_{I_{\text{Сид}} = 15 \text{ мА}}$, построенный по табл. 4.

5. График ВАХ фоторезистора ФСД-1 $I_{\text{ФСД1}}(U_{\text{ФСД1}})$, построенный по табл. 4.

6. Выводы.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление внутреннего фотоэффекта?
2. Объясните причину нелинейности световой характеристики фоторезистора в области больших световых потоков.
3. Какие параметры полупроводникового материала важны для работы фоторезистора?
4. Возможно ли использование фоторезисторов в качестве оптических переключателей в СВЧ-устройствах?
5. В чем заключаются особенности включения фоторезисторов в электрические схемы?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. ФОТОДИОДЫ

Цель работы: изучение основных физических закономерностей, определяющих свойства и параметры фотодиодов, исследование вольт-амперных и световых характеристик фотодиодов.

Фотодиод – полупроводниковый прибор, в котором используется эффект разделения на границе р-п перехода неравновесных носителей, создаваемых светом. Фотодиод выполняется обычно на монокристалле германия или кремния (рис. 20). Освещаемая область обычно слабо легирована (на рис. 24 – n-область), имеет большое время жизни τ_p и, следовательно, большую диффузионную длину L_p (расстояние, на котором количество неравновесных носителей, которые генерируются при освещении, уменьшается в e раз). Ширину освещаемой области W выбирают таким образом, чтобы она была меньше L_p .

При отсутствии освещения существует равновесное состояние между тепловыми потоками носителей через переход из n-области в p-область и в противоположном направлении. При освещении n-области в ней образуются неравновесные электроны и дырки, после чего фотоносители диффундируют вглубь n-области. Электроны и дырки разделяются электрическим полем р-п перехода: дырки переходят в р-область, а электроны не могут преодолеть потенциальный барьер (рис. 20в). Таким образом, возникает дырочный ток I_f , который нарушает тепловое равновесие и приводит к тому, что р-область заряжается положительно. Возникающая разность потенциалов уменьшает потенциальный барьер, что соответствует смещению р-п перехода в прямом направлении. Возникающий при этом прямой ток через р-п-переход направлен противоположно по отношению к фототоку и компенсирует его. При некотором напряжении (напряжении фото-ЭДС) устанавливается равновесие.

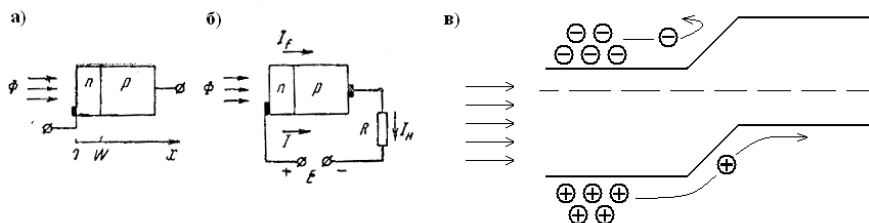


Рис. 20. Схематическое изображение фотодиода (а), схема его включения (б) и принцип работы (в)

Фотодиод может работать в двух режимах: фотогальваническом (без внешнего напряжения) и фотодиодном (обратное внешнее напряжение, которое используется для того, чтобы подавить прямой ток через р-п-переход, вызванный появлением фото-ЭДС). Вольт-амперная характеристика фотодиода описывается выражением

$$I_{\phi\Delta} = U / R = I_{\phi} - I_{pn} = I_{\phi}(\Phi) - I_0(e^{U/\phi_T} - 1), \quad (1)$$

где I_{ϕ} – фототок, R – сопротивление нагрузки, I_{p-n} – ток р-п перехода, U – напряжение на диоде, I_0 – тепловой ток р-п перехода, ϕ_T – температурный потенциал. Семейство ВАХ, определяемых выражением (1), приведено на рис. 21. Квадрант I на рис. 21 – это нерабочая область фотодиода. Квадрант III – это фотодиодная область работы фотодиода. В этой области фототок фактически не зависит от обратного напряжения и сопротивления нагрузки, а зависимость фототока от светового потока Φ практически линейна. ВАХ нагрузочного резистора R (линия нагрузки) представляет собой прямую линию, уравнение которой имеет вид:

$$E_{обp} - I_{\phi} R = U,$$

где $E_{обp}$ – напряжение источника обратного напряжения. Так как фотодиод и нагрузочный резистор соединены последовательно, через них протекает один и тот же ток I_{ϕ} , который можно определить по точке пересечения ВАХ фотодиода и нагрузочного резистора (рис. 21, квадрант III). В фотодиодном режиме при заданном световом потоке Φ фотодиод является источником тока по отношению к внешней цепи.

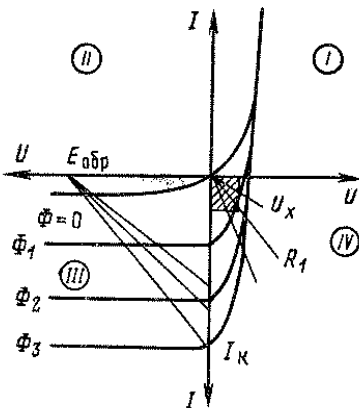


Рис. 21. Семейство ВАХ фотодиода ($\Phi_1 < \Phi_2 < \Phi_3$)

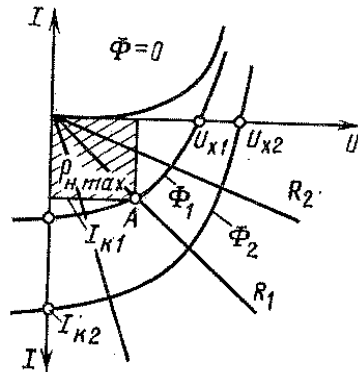


Рис. 22. Вольт-амперная характеристика фотодиода в фотогальваническом режиме

Фотогальваническому режиму работы фотодиода соответствует квадрант IV (рис. 22). По точкам пересечения ВАХ с осью напряжения можно определить значения фото-ЭДС (напряжение холостого хода при $R = \infty$) при разных потоках Φ . У кремниевых фотодиодов значение фото-ЭДС равно 0,5–0,55 В. Точка пересечения ВАХ с осью токов соответствует значениям токов короткого замыкания ($R = 0$). Промежуточные значения сопротивления нагрузки определяются линиями нагрузки, которые при разных значениях R выходят из начала координат под разным углом.

Приборы, используемые в работе

Лабораторный макет, 2 источника напряжения, 2 амперметра, вольтметр.

Описание лабораторной установки

Для питания светодиода 1 к клеммам 8, 12 подключается источник напряжения (рис. 23). Миллиамперметр (до 200 мА), измеряющий ток, протекающий через светодиод, подключается к клеммам 8, 9. Для изменения напряжения на светодиоде служит переменный резистор 11 номиналом до 1,5 кОм. Источник напряжения, подаваемого на фотодиод 6, подключается к клеммам 2, 7. Микроамперметр для измерения тока, протекающего через фотодиод, подключается к клеммам 2, 3. Вольтметр, измеряющий напряжение на фотодиоде, подключается к клеммам 5, 7. В качестве резистора нагрузки используется переменный резистор 4 номиналом до 4,7 кОм.

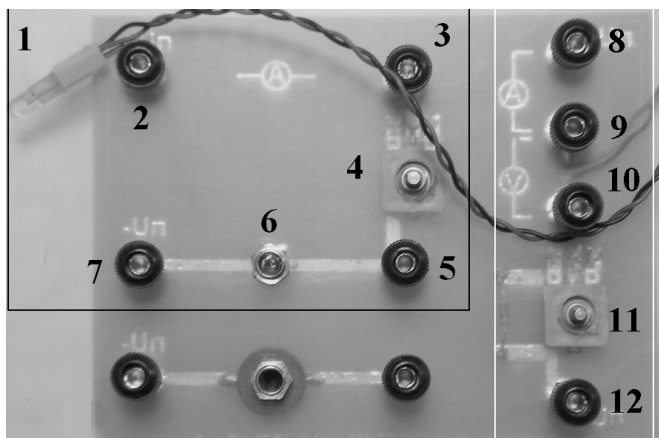


Рис. 23. Лабораторный макет для исследования вольтамперных и световых характеристик фотодиодов

Порядок выполнения работы

1. Подключить к макету источники напряжения и измерительные приборы.

2. Определить ВАХ фотодиода ФД-256, используя красный светодиод и задавая ток, протекающий через светодиод, равным 5, 10, 20 мА. Прямое напряжение на фотодиоде задавать равным 0, +0,05, +0,10, +0,15 В, обратное напряжение -1, -2, -3, -4, -5 В.

Содержание отчета

1. Принцип работы фотодиода: зонная диаграмма, фотогальванический, фотодиодный режим работы.

2. Результаты измерений представить в виде табл. 5.

Т а б л и ц а 5

ВАХ фотодиода ФД-256

$U_{\text{ФД-3}}$	$I_{\text{ФД-3}} _{I_{\text{сид}} = 5 \text{ мА}}$	$I_{\text{ФД-3}} _{I_{\text{сид}} = 10 \text{ мА}}$	$I_{\text{ФД-3}} _{I_{\text{сид}} = 20 \text{ мА}}$

3. ВАХ фоторезистора ФД-3 $I_{\text{ФД-3}}(U_{\text{ФД-3}})$, построенные по табл. 5 на одном графике. На графике необходимо отметить значение фото-ЭДС фотодиода ФД-256.

4. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Какая составляющая тока является паразитной в фотодиоде?
2. Какой должна быть толщина освещаемой области светодиода?
3. Почему для изготовления фотодиодов обычно используют кремний и германий, а не соединения $A^{III}B^V$, применяемые при производстве светодиодов?

4. Каким элементом является фотодиод по отношению к внешней электрической цепи в фотодиодном режиме работы?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. ОПТОПАРЫ

Цель работы: изучение выходной и передаточной характеристики транзисторной оптопары.

Оптопарой (оптроном) называется оптоэлектронный прибор, содержащий излучатели и фотоприемники, оптически и конструктивно связанные друг с другом. В излучателях энергия входного электрического сигнала преобразуется в оптическое излучение, а в фотоприемниках оптический сигнал вызывает выходной электрический ток или напряжение.

Качество излучателя определяет, прежде всего, срок службы оптопары, тогда как схематехнические особенности оптопары определяются фотоприемником.

Поскольку связь входа и выхода внутри оптопары осуществляется при помощи оптических сигналов, оптопара осуществляет электрическую изоляцию (гальваническую развязку) входа и выхода.

Источником излучения в большинстве оптопар являются инжекционные светодиоды. Для излучателей оптронов, как правило, применяют материалы GaAs, GaAlAs, GaAsP, которые излучают в красной (0,67–0,7 мкм) и ближней инфракрасной (0,8–0,95 мкм) областях спектра.

В зависимости от типа фотоприемника выделяют следующие типы оптопар (рис. 28): резисторная (R), диодная (Д), транзисторная (Т), тиристорная (У), с составным фототранзистором (с транзистором Дарлингтона) (Т²), диодно-транзисторная (ДТ) (рис. 24).

Составной транзистор Дарлингтона применяют для увеличения коэффициента усиления. В нем выходной ток первого транзистора подается в базу второго транзистора. Если β_1 и β_2 – коэффициенты усиления по току первого и второго транзисторов, то коэффициент усиления по току составного транзистора равен $\beta_1 \cdot \beta_2$.

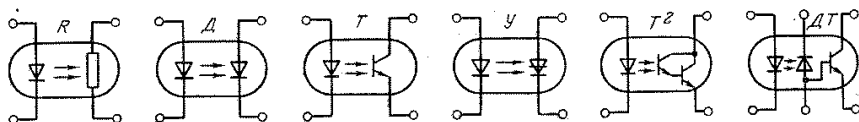


Рис. 24. Условные обозначения оптопар

Фототранзистор – это управляемый светом прибор с двумя взаимодействующими между собой электрическими переходами.

На рис. 25 представлено устройство, схема включения и семейство выходных характеристик фототранзистора p-n-p-типа. Фототранзистор состоит из эмиттерной области (p^+ – типа) – 1; области базы (n – типа) – 2, большая часть которой открыта световому потоку; широкой коллекторной области (p – типа) – 3. Входным сигналом фототранзистора является световой поток, а выходным – изменение напряжения на коллекторе. Оптический сигнал генерирует в области пассивной базы (область вне перехода эмиттер-база) носители заряда. Эти носители диффундируют к коллекторному переходу и разделяются его электрическим полем, подобно тому, как это происходит в фотодиоде. Основные носители (электроны) накапливаются в базе и компенсируют заряд неподвижных ионов примесей на границе эмиттерного перехода, что вызывает инжекцию носителей из эмиттера в базу. Ток инжектированных носителей, а соответственно и коллекторный ток многократно превышают фототок. Фототранзистор можно представить в виде эквивалентного фотодиода VD, образованного пассивной базой и областью коллектора, а также усилительного транзистора (рис. 25б). Транзистор увеличивает чувствительность фотодиода в 3–10 раз.

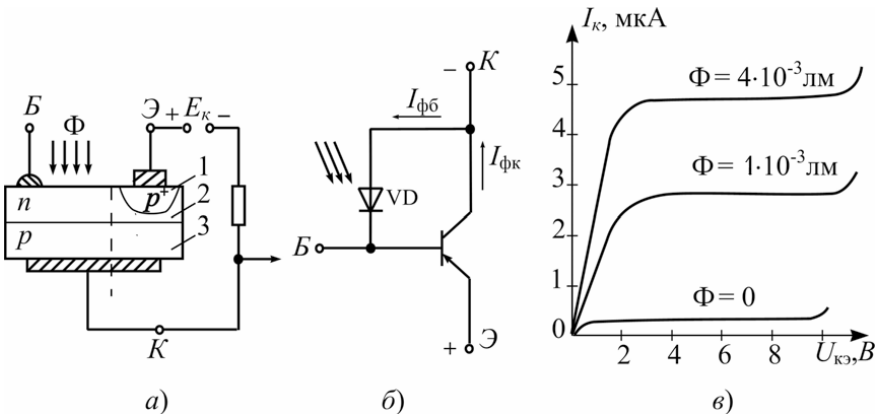


Рис. 25. Фототранзистор p-n-p типа: (а) – устройство; (б) – схема включения; (в) – семейство выходных характеристик

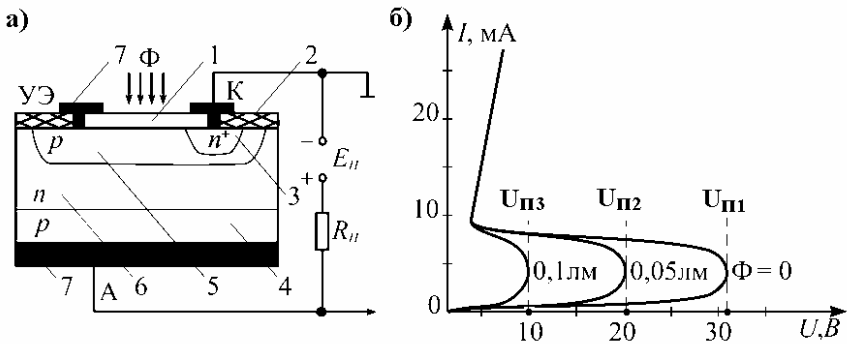


Рис. 26. Фототиристор: (а) устройство; (б) семейство выходных характеристик

Семейство выходных характеристик фототранзистора аналогично выходным характеристикам обычного транзистора, только управление работой фототранзистора осуществляется не током базы, а световым потоком Φ . Световая характеристика фототранзистора линейна только при малых световых потоках.

Для управления большими токами в ключевом режиме (т. е. включение и выключение тока) используют фототиристоры – оптоэлектронные приборы с тремя p - n -переходами. Устройство фототиристора и схема включения приведены на рис. 26, где 1 – просветляющее покрытие; 2 – диэлектрический слой; 3 и 4 эмиттерные области соответственно n^+ и p – типа; 5 и 6 – базовые области p - n типа; 7 – выводы фототиристора (УЭ – управляющий электрод, К – катод, А – анод).

Выходная характеристика фототиристора подобна выходной характеристике обычного тиристора (рис. 26б). При увеличении напряжения между анодом и катодом до пороговой величины $U_{п}$ происходит включение фототиристора – резко падает сопротивление между анодом и катодом, в результате чего уменьшается напряжение анод-катод и резко возрастает выходной ток. При увеличении светового потока Φ пороговое напряжение $U_{п}$ уменьшается. Напряжение питания $E_{н}$ должно быть ниже порогового напряжения, соответствующего отсутствию светового потока, и выше порогового напряжения, соответствующего минимальному значению рабочего светового потока.

Эффективность передачи электрического сигнала со входа оптопары на выход определяется передаточными параметрами, основным из которых является коэффициент передачи по току k – отношение тока на выходе оптопары к току на входе оптопары.

Для диодных оптопар характерно небольшое значение коэффициента k ($\sim 1\%$), однако они обладают наиболее линейной передаточной характеристикой. Поэтому диодные оптопары широко применяются для передачи аналогового сигнала. Коэффициент передачи по току транзисторных оптопар достигает 1000% (для оптопар с составным фототранзистором), однако для них характерна нелинейная передаточная характеристика. Для тиристорных оптопар понятие передаточной характеристики не применяют, поскольку их используют, прежде всего, в ключевом режиме.

Приборы, используемые в работе

Лабораторный макет, 2 источника напряжения, 2 амперметра, вольтметр.

Описание лабораторной установки

Для питания светодиода оптопары 6 к клеммам 1, 5 подключается источник напряжения (рис. 28). Миллиамперметр (до 200 mA), измеряющий ток, протекающий через светодиод оптопары, подключается к клеммам 1, 2 (рис. 33). Для регулирования силы тока, протекающего через светодиод, служит переменный резистор 4. Источник питания фототранзистора оптопары подключается к клеммам 7, 11. Миллиамперметр для измерения силы тока I_K , протекающего через фототранзистор, подключается к клеммам 7, 8. Вольтметр, измеряющий напряжение $U_{КЭ}$ фототранзистора, подключается к клеммам 8, 9. Для регулирования напряжения $U_{КЭ}$ используется переменный резистор нагрузки 10.

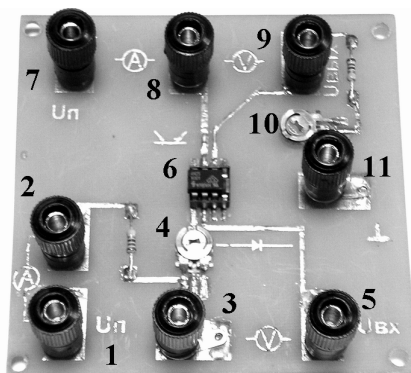


Рис. 28. Макет для измерения электрических параметров оптопары

Порядок выполнения работы

1. Подключить к макету источники напряжения и измерительные приборы.
2. Снять выходную характеристику транзисторной оптопары 4N25 для выходных напряжений $U_{КЭ} = 0,5, 1, 2, 3, 4, 5$ В при трех значениях входного тока: 1, 5, 50 мА.
3. Снять передаточную характеристику транзисторной оптопары для значений входных токов 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 мА при $U_{КЭ} = 2$ В.

Содержание отчета

1. Устройство и назначение оптопар, их основные характеристики.
2. Результаты измерений представить в виде табл. 6, 7.

Т а б л и ц а 6

$U_{КЭ}, В$	I_K при $I_{вх} = 1$ мА	I_K при $I_{вх} = 5$ мА	I_K при $I_{вх} = 50$ мА

Т а б л и ц а 7

$I_{вх}, мА$	$I_{вых}, мА$	k

3. Семейство выходных характеристик оптопары, передаточная характеристика оптопары.
4. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные типы оптопар.
2. Что такое транзистор Дарлингтона и для чего он применяется в составе оптопар?
3. Укажите рабочую область фототранзистора на семействе выходных характеристик.
4. Объясните принцип построения нагрузочной линии для фототранзистора.
5. В каких пределах будет изменяться ток коллектора в фототранзисторе с выходной характеристикой, изображенной на рис. 29,

при изменении напряжения питания от 5 до 9 В, если сопротивление нагрузки равно 2 МОм, а $\Phi = 1 \cdot 10^{-3}$ лм?

6. В чем заключается назначение фототиристоров?

7. В чем заключается отличие передаточной характеристики диодной оптопары от передаточной характеристики транзисторной оптопары?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астайкин А.И. Основы оптоэлектроники : учеб. пособие / А.И. Астайкин, М.К. Смирнов. – М. : Высш. шк., 2007. – 277 с.
2. Гребнев А.К. Оптоэлектронные элементы и устройства / А.К. Гребнев, В.Н. Гридин, В.П. Дмитриев. – М. : Радио и связь, 1998. – 336 с.
3. Носов Ю.Р. Оптоэлектроника / Ю.Р. Носов. – М. : Радио и связь, 1989. – 359 с.

Учебное издание

ЭЛЕМЕНТЫ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

Учебное пособие

Составители:

Богатиков Евгений Васильевич,
Меньшикова Татьяна Геннадьевна

Редактор С.Ю. Дробина

Подп. в печ. 10.06.2010. Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. 1,8. Тираж 50 экз. Заказ 598.

Издательско-полиграфический центр
Воронежского государственного университета.
394000, г. Воронеж, пл. им. Ленина, 10. Тел. (факс): +7 (4732) 598-026
<http://www.ppc.vsu.ru>; e-mail: pp_center@ppc.vsu.ru

Отпечатано в типографии

Издательско-полиграфического центра
Воронежского государственного университета.
394000, г. Воронеж, ул. Пушкинская, 3. Тел. 204-133