

Министерство общего и профессионального образования  
Российской Федерации

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ им. А. Н. ТУПОЛЕВА

---

Кафедра теоретической радиотехники  
и электроники

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ**

Методические указания  
к лабораторной работе №204

Казань-2004

УДК 621.382.3.01 (076.5)

Составители:

И. К. Насыров, Л. И. Климова, Л. М. Урманчеев.

Исследование элементов оптоэлектроники: Методические указания к лабораторной работе № 204 /Казан. гос.техн. ун-т; Сост. И.К.Насыров, Л.И.Климова, Л.М.Урманчеев., Казань, 2004. 23 с.

Цель работы – изучение принципа действия, характеристик и параметров фотоэлектрических и оптоэлектронных приборов.

Фотоэлектрические приборы разделяются на две группы. К первой группе относятся полупроводниковые фотоэлектрические излучающие приборы и оптоэлектронные пары. Ко второй группе относятся электровакуумные фотоэлектронные приборы – фотоэлементы и фотоэлектронные умножители.

В настоящей работе исследуется: вакуумный фотоэлемент.

Полупроводниковые приборы – фоторезистор, фотодиод, оптоэлектронные пары на основе фотодиода, фототранзистора и фототиристора.

Краткие сведения из теории фотоэлектрических приборов.

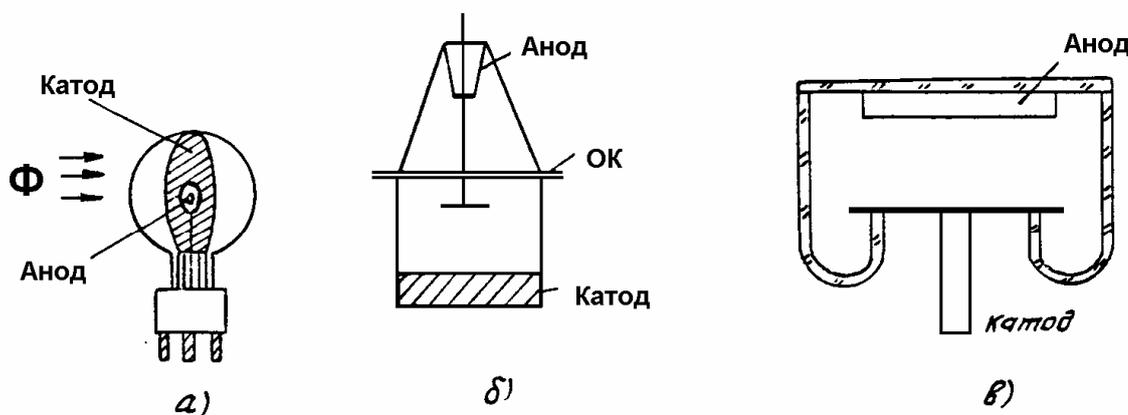


Рис.1

### Электровакуумный прибор

1.1 Электровакуумный фотоэлемент – прибор, в котором используется явление внешнего фотоэффекта. В настоящее время наиболее широко применяются электровакуумные фотоэлементы, которые имеют два электрода: фото катод, служащий источником электронов, и анод, собирающий фотоэлектроны (рис.1). Анод изготавливается в виде плоской сетки, кольца, диска и и.т.д., анод без больших потерь должен пропускать свет на фотокатод. В видимой, инфракрасной и ближней ультрафиолетовой областях спектра чаще применяются фотокатоды на основе полупроводниковых материалов.

Основными параметрами фотокатодов являются интегральная и монохроматическая токовая чувствительность, квантовый выход, удельные сопротивления на 1-см<sup>2</sup> площади фоточувствительного слоя, плотность тока термоэлектронной эмиссии при комнатной температуре.

На рис.1 приведены три основные группы фотоэлементов:

- фотоэлементы с массивным непрозрачным фотокатодом, нанесенным на дно стеклянной колбы (баллона) (рис.1а). Эти приборы являются приемниками постоянных или модулированных низкой частотой ( $f < 20\text{кГц}$ ) световых потоков и используется в контрольно-измерительной аппаратуре, автоматике, аппаратуре звуковоспроизведения;

- фотоэлементы с массивным небольшим катодом, нанесенным на дно баллона, или на специальную металлическую пластину, - эти приборы предназначены для приема сфокусированного излучения малой интенсивности (рис.1б),

- импульсные сильноточные элементы с фотокатодом на металлической подложке, имеющие малое продольное сопротивление, малую инерционность (около  $10^{-3}$ с), линейную энергетическую характеристику. Для уменьшения токов утечки в баллон часто варивают специальные охранные кольца (рис1б).

Параметрами фотоэлементов являются: чувствительность, квантовый выход или квантовая эффективность, шумы, минимально регистрируемая мощность излучения (пороговый поток), темновой ток, постоянная времени, сопротивление, эксплуатационные и конструктивные параметры.

К основным характеристикам фотоэлементов относятся: спектральные, вольтамперные, энергетические, частотные, температурные (рис.2).

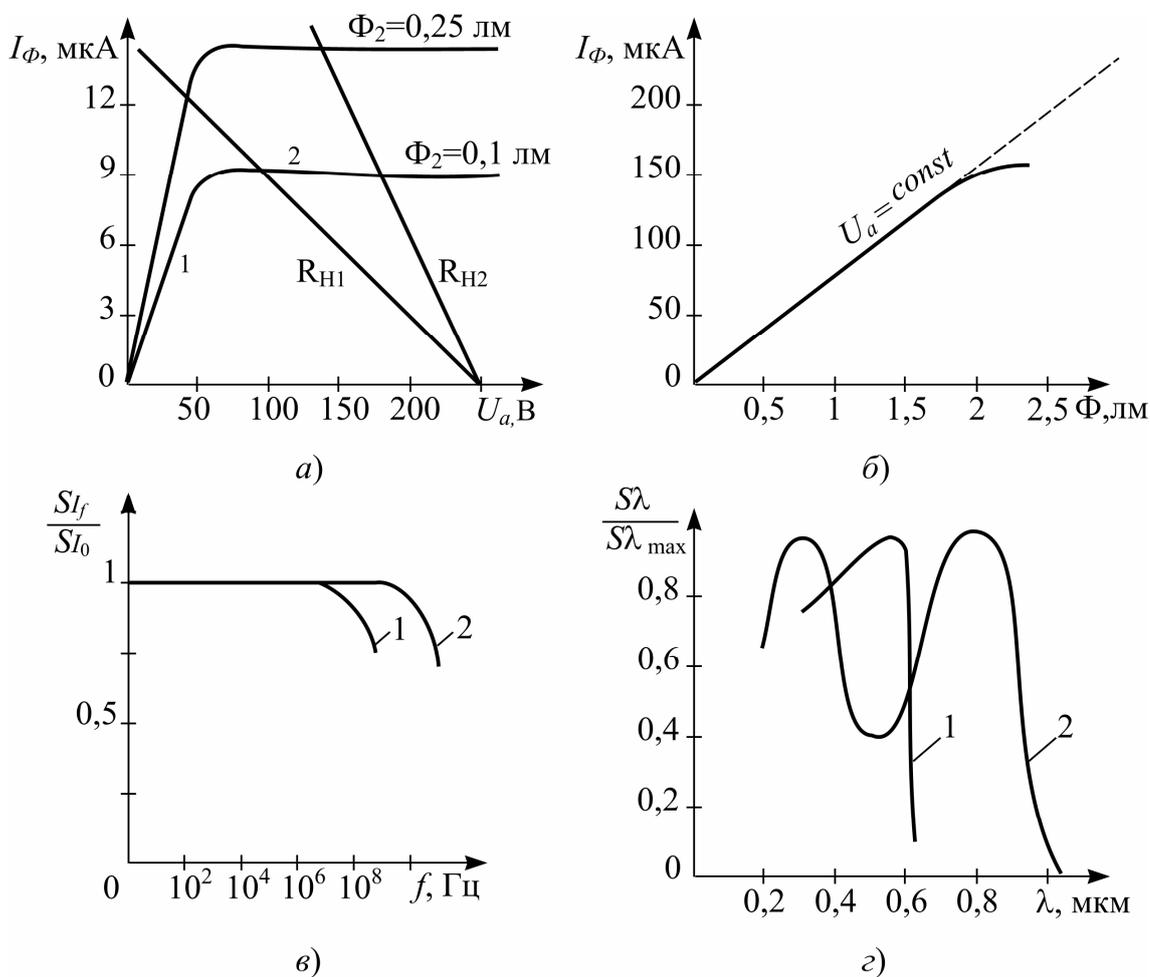


Рис.2

Вольтамперными характеристиками фотоэлемента (рис.2а) называют зависимость фототока  $I_\phi$  от напряжения анода при неизменном световом потоке  $\Phi = \text{const}$ . На вольтамперных характеристиках имеется два участка: участок 1 - соответствует режиму объемного заряда, участок 2 - режиму насыще-

ния. На участке насыщения большой ток соответствует большим световым потокам  $\Phi$ .

Энергетическая или световая характеристика (рис.2б) - это зависимость фототока  $I_{\Phi}$  от интенсивности светового потока  $\Phi$  при неизменном анодном напряжении. На значительном участке фототок пропорционален интенсивности светового потока и отклонение от линейности при больших  $\Phi$  обусловлено влиянием объемного заряда.

Частотными характеристиками фотоэлементов называют зависимость их чувствительности от частоты изменения (модуляции) интенсивности светового потока, воздействующего на фотоэлемент (рис.2в). Эти характеристики обусловлены инерционностью фотоэлементов, в частности влиянием времени пролета электронов от катода до анода и емкостью фотоэлемента.

Спектральными характеристиками фотоэлементов называют зависимости монохроматической чувствительности  $S_{\lambda}$  (интегральная чувствительности  $S_{\lambda} = I_{\Phi} / \Phi$ ) от длины электромагнитной волны  $\lambda$  (или частоты), воздействующей на фотокатод электровакуумного фотоэлемента (рис.2г). Эти характеристики зависят в основном от электрофизических параметров полупроводниковых материалов, из которых изготовлены фотокатоды.

## 2. Фотоэлектрические полупроводниковые приборы.

2.1. Фотоэлектрические эффекты в p-n переходе. При облучении p-n перехода световым потоком с энергией фотонов, превышающей ширину запрещенной зоны полупроводника, в переходе и прилегающих к нему областях оптически генерируются электроны и дырки.

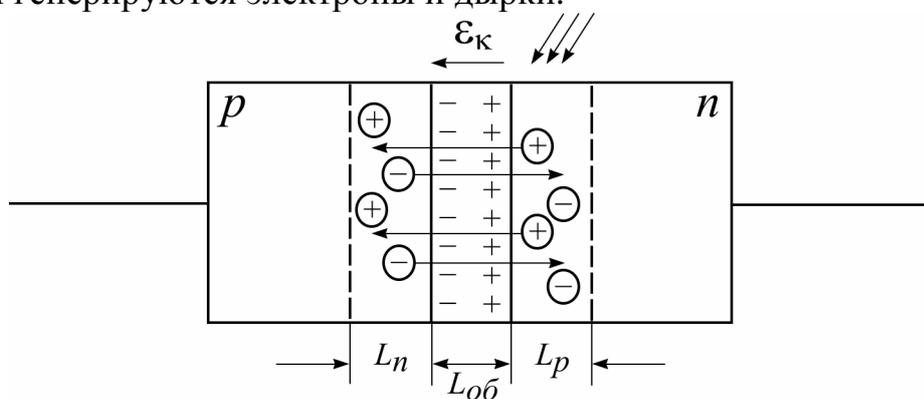


Рис.3

Электрическое поле перехода  $\epsilon_k$  перемещает дырки в p-область, а электроны в n-область, разделяя тем самым генерируемые носители. Процессу разделения подвергаются носители, генерируемые в обедненной области перехода  $L_{об}$  и прилегающих в ней областях, размером примерно равным диффузионной длине неосновных носителей.

Через p-n переход протекает дрейфовый фототок неравновесных неосновных носителей. Неравновесные основные носители не могут преодолеть потенциальный барьер перехода и остаются в области генерации. В результате

разделения оптически генерируемых носителей концентрации электронов в n-области и дырок в p-области повышаются, что приводит к компенсации объемного заряда неподвижных примесных ионов на границах перехода. Потенциальный барьер, как и при прямом напряжении, уменьшается на величину фото-ЭДС, называемую напряжением холостого хода  $U_{xx}$  при разомкнутой внешней цепи. Снижение потенциального барьера увеличивает ток диффузии основных носителей через переход. Он направлен навстречу фототоку. В стационарном состоянии при  $\Phi = const$  ток диффузии равен дрейфовому току, состоящему из фототока  $I_\Phi$  и теплового тока  $I_0$  перехода, т.е. выполняется динамическое равновесие

$$I = I_{\partial\Phi} - I_\Phi - I_0 = 0 \quad (1)$$

В идеализированном p-n переходе ток диффузии и тепловой ток связаны зависимостью

$$I_{\partial\Phi} = I_0 \cdot e^{U_{xx}/\varphi_T} \quad (2)$$

Тогда из условия (1) следует, что

$$I_\Phi = I_0(e^{U_{xx}/\varphi_T} - 1) \quad (3)$$

или для напряжения холостого хода можно записать в виде

$$U = \varphi_T \cdot \ln(1 + I_\Phi/I_0) \quad (4)$$

При подключении к освещенному переходу нагрузочного резистора  $R_H$  уменьшается ток во внешней цепи, т.е.  $I_H < I_{KЗ}$ , где  $I_{KЗ}$  ток короткого замыкания. Это означает, что не все оптически генерируемые носители могут быть удалены из p-n перехода этим током. Поэтому в переходе возникает фото-ЭДС, значение которой меньше напряжения холостого хода. При  $\Phi = const$  ток во внешней цепи

$$I_H = I_\Phi + I_0 - I_{д\Phi} \quad (5)$$

а напряжение на нагрузке равно  $U_H = I_H \cdot R_H$

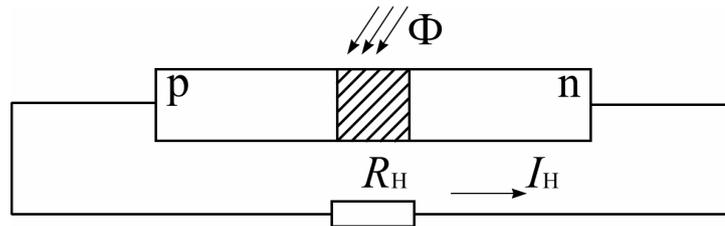


Рис.4.

В новом динамическом равновесии имеет

$$I_{д\Phi} = I_0 \cdot e^{U_H/\varphi_T} \quad (6)$$

Тогда из условия (5) находим

$$U_H = \varphi_T \cdot \ln \left( 1 + \frac{I_\Phi - I_H}{I_0} \right) \quad (7)$$

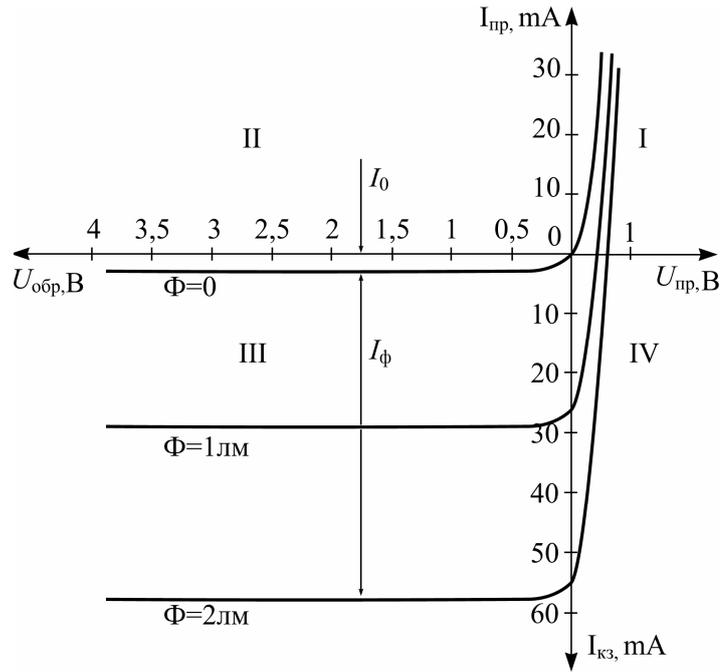


Рис.5

Эта зависимость описывает вольтамперную характеристику (ВАХ) идеализированного р-п перехода. Семейство ВАХ р-п перехода со световым потоком в качестве параметра показана на рис.5

2.2 Фотодиод – управляемый излучением прибор с двумя выводами, работа которого основана на использовании фотогальванического эффекта в обратном включенном электрическом переходе. Его электрический переход работает в фотодиодном режиме (рис.6)

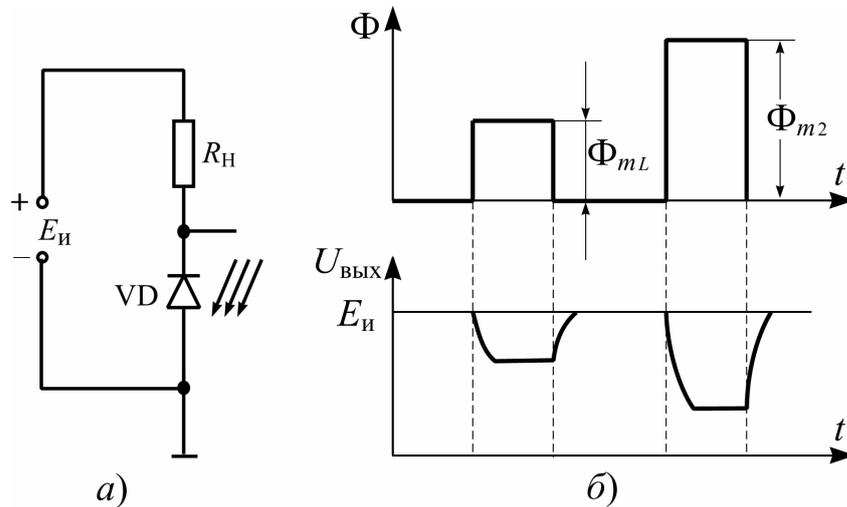


Рис.6.

Основные параметры фотодиода – это токовая интегральная и дифференциальная чувствительности,

$$S_{H\Phi} = I_{\Phi} / \Phi \text{ мА} \cdot \text{лм}^{-1}, \quad S_{\partial\Phi} = \partial I_{\Phi} / \partial \Phi \text{ мА} \cdot \text{лм}^{-1},$$

постоянная времени нарастания и спада фототока (граничная частота модуляции светового потока), пороговый поток или пороговая мощность излучения, рабочая длина волны (диапазон рабочих волн).

### 2.3. Фототранзистор и фототиристор

Фототранзистор – это управляемый излучением прибор с двумя или большим числом взаимодействующих между собой электрических переходов (рис.7). Его применяют в качестве чувствительного к излучению элемента оптоэлектронных пар и фотоприемных устройств.

Различают биполярные и полевые фототранзисторы. К фототранзисторам относится также фототиристор. Фототиристор – управляемый излучением прибор с тремя или большим числом электрических переходов.

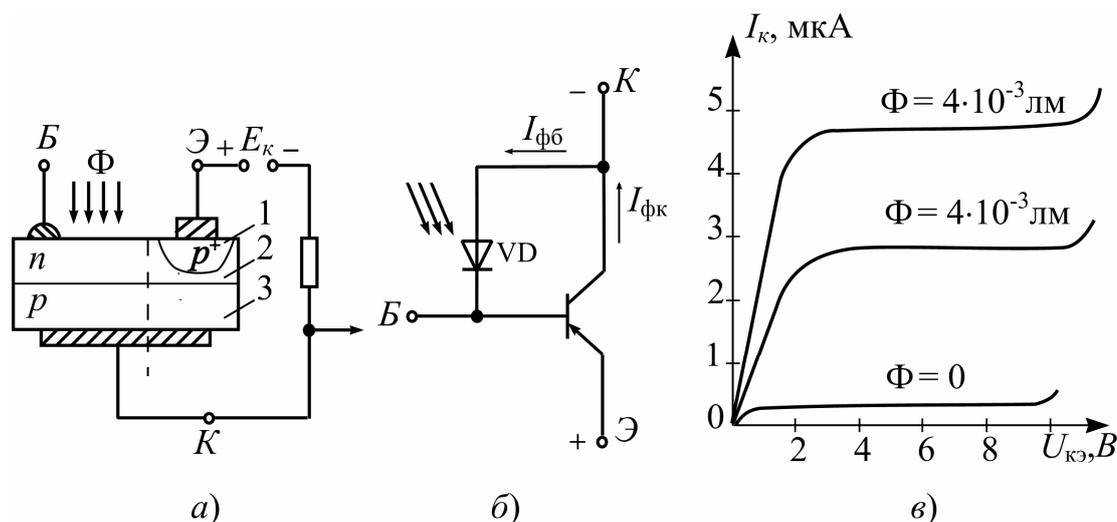


Рис.7

Устройство и схема включения биполярного фототранзистора показана на рис.7. Фототранзистор состоит из эмиттерной области (P<sup>+</sup> – 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 коллекторном переходе и в области пассивной базы носители заряда. Эти носители диффундируют в базу к коллекторному переходу и разделяются его электрическим полем. Основные носители 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.7б). Транзистор увеличивает чувствительность фотодиода в (3-10) раз.

Семейство выходных характеристик фототранзистора в схеме ОЭ приведено на (рис.7в). Световая характеристика фототранзистора линейна только при малых потоках.

Устройство фототиристора и схема включения приведена на (рис.8а), 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).

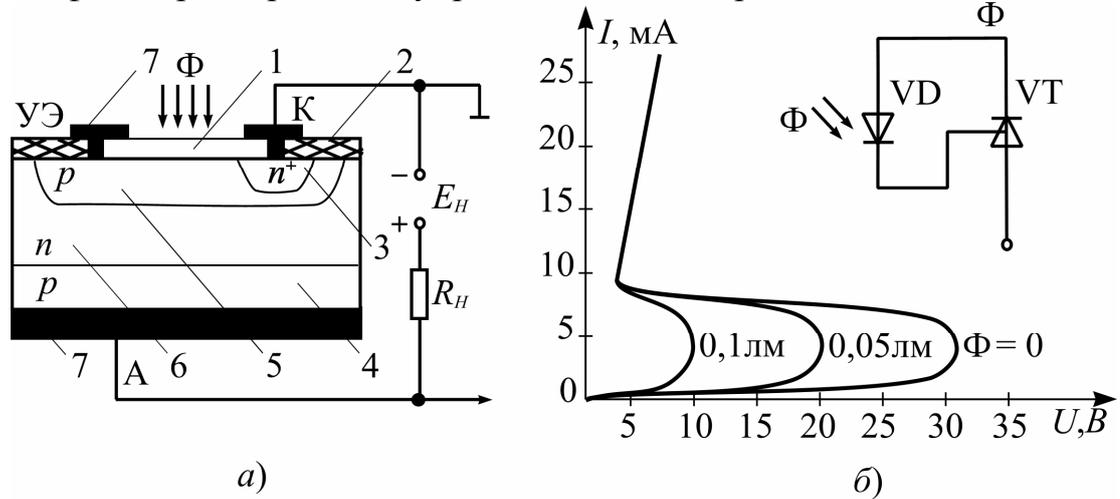


Рис.8

Оптический сигнал генерирует неравновесные носители, в результате чего в базовых областях накапливаются основные носители заряда, понижающие потенциальный барьер эмиттерных переходов. В дальнейшем процессе включения фототиристора происходит так же, как и при подаче импульса управляющего тока в цепь его базы.

Фототранзистор эквивалентен фотодиоду VD, фототок, которого управляет включением тиристора VT (рис.8б). На этом же рисунке приведено семейство ВАХ фототиристора, где в качестве параметра используется световой поток.

2.3 Фоторезисторы – это фотоэлектрический прибор с двумя выводами, сопротивление которого изменяется под действием излучения.

Принцип работы фоторезистора и схема его включения поясняются на (рис.9а). При световом потоке  $\Phi=0$  сопротивление фоторезистора  $10^6$ - $10^7$  Ом. Импульс светового потока генерирует в фоторезисторе  $R_\Phi$  оптически возбужденные носители, снижающие его сопротивление и время их жизни. Пропорционально световому потоку возрастает значение  $I_\Phi$  тока во внешней цепи (рис.9б).

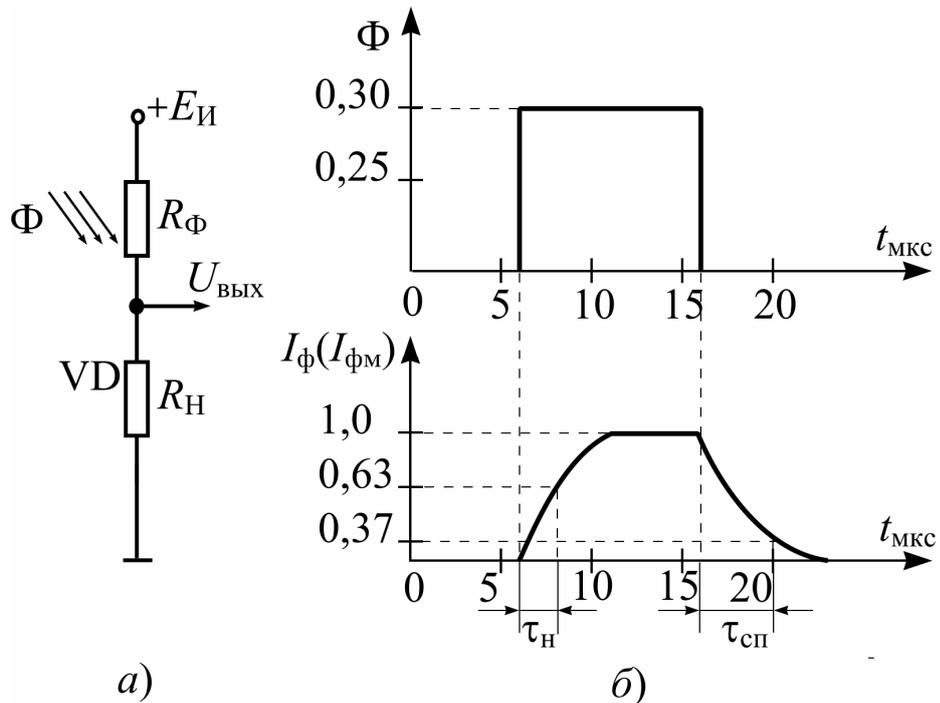


Рис.9.

На резисторе  $R_H$  происходит изменение напряжения на величину

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}} = I_{\Phi} \cdot R_H$$

Чувствительные элементы фоторезисторов имеют поперечную и продольную (рис.10) проводимость.

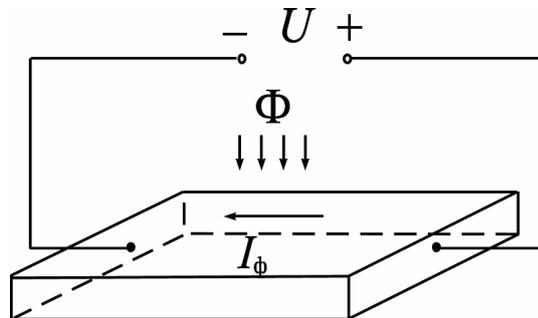


Рис.10

Параметром семейства ВАХ (рис.11) является световой поток. Вольт-амперная характеристика фоторезистора  $I = U/R_{\Phi}$  является нелинейной.

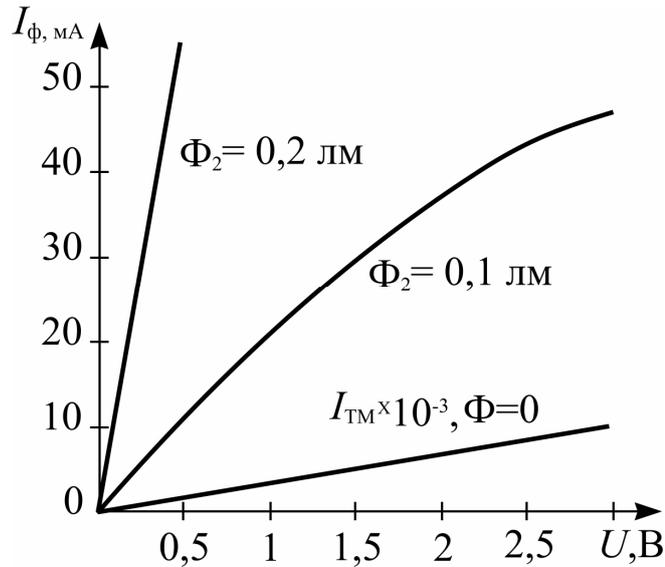


Рис.11

Спектральные характеристики фоторезисторов, нормированные относительно максимального значения чувствительности  $S_{\text{МАКС}}$  на длине волны  $\lambda_{\text{МАКС}}$ , приведены на (рис.12). Эти характеристики определяются конкретной зависимостью проводимости  $\sigma_{\Phi} = f(\lambda)$  для каждого материала.

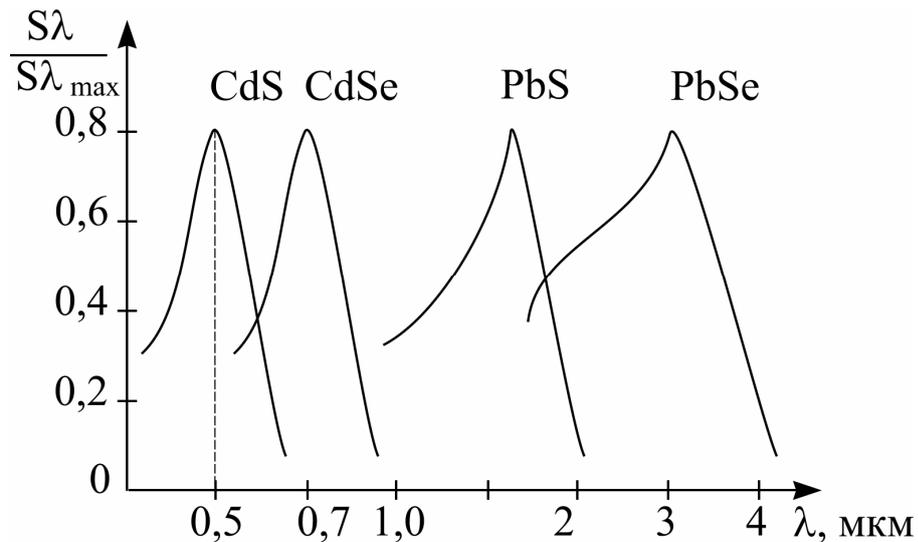


Рис.12.

Световые или энергетические характеристики фоторезисторов  $I_{\Phi} = \varphi(\Phi)$  линейные для небольших световых потоков (рис.13). При световых потоках  $\Phi > \Phi_{\text{МАКС}}$  из-за увеличения концентрации генерируемых неравновесных носителей возрастает вероятность их рекомбинации. Линейность световой характеристики нарушается. Нижняя граница световой характеристики  $\Phi_{\text{МИН}}$  соответствует пороговому потоку.

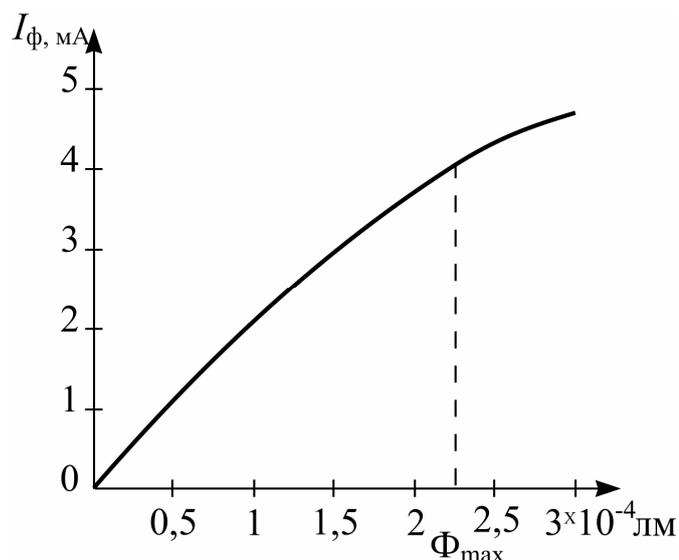


Рис.13.

### 3. Оптроны

#### 3.1 Устройства оптронов

Оптрон – это прибор, содержащий источник и приемник излучения, которые оптически и конструктивно связаны друг с другом. Источниками света могут служить лампы накаливания, неоновые лампы, электролюминесцентные панели, однако, в большинстве случаев ими являются светодиоды. В качестве приемника излучения используют фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы и фототиристоры. Средой оптического канала, связывающего излучатель и приемник, могут служить воздух, стекло, пластмасса и другие прозрачные вещества.

Элементарный оптрон, содержащий один источник и один приемник излучения, называют также оптопарой. Будучи объединенными в микросхему вместе с одним или несколькими согласующими или усиливающими устройствами, оптопары образуют оптоэлектронную интегральную микросхему.

В оптронах происходит двойное преобразование энергии (рис.14). Входной электрический сигнал, характеризующийся силой тока  $I_1$  или напряжением  $U_1$ ,

преобразуется источником излучения 1 в световой поток света  $\Phi_1$ , который передается затем по оптическому каналу 2 к фотоприемнику 3.

Фотоприемник осуществляет обратное превращение светового сигнала в электрический  $I_2, U_2$ . Среда оптического канала

может быть управляемой (например, обладать электрооптическими свойствами), что отражено на (рис.14) введением в схему устройства управления 4, которое преобразует световой поток  $\Phi_1$  в поток  $\Phi_2$ . Для согласования парамет-

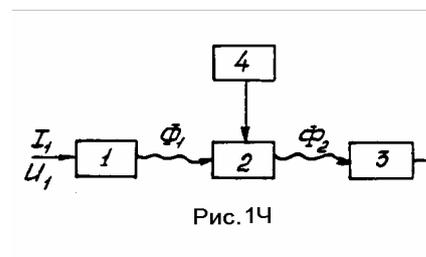


Рис.14

ров оптронов с другими элементами электронных схем могут использоваться дополнительные входные и выходные устройства.

Как уже отмечалось, источником излучения во оптронах в большинстве случаев служат инжекционные светодиоды. Помимо необходимости получения возможно больших к.п.д. преобразования электрической энергии в световую и высокого быстродействия светодиода, применяемые в оптронах, должны обладать достаточно узкой направленностью излучения (для снижения потерь энергии на пути от источника света к фотоприемнику) и работать при сравнительно небольших входных токах (для согласования с микроэлектронными системами управления). Желательно также, чтобы квантовый выход таких излучателей был постоянным, по возможности, в более широком диапазоне входных токов, что важно для использования этих приборов в аналоговых схемах. В оптронах могут применяться также полупроводниковые лазеры. Этому препятствует, однако, большие значения рабочих токов таких приборов, их сравнительно низкая долговечность и высокая стоимость.

Наиболее употребительными материалами для излучателей оптронов являются  $GaAs$ ,  $GaAlAs$ ,  $GaAsP$ . Светодиоды на основе этих материалов излучают в красной (0,67 – 0,7 мкм) и ближней инфракрасной (0,8 – 0,95 мкм) областях спектра.

Важнейшим достоинством оптронов является их способность осуществлять гальваническую развязку элементов электронной схемы. Оптоны, у которых в качестве оптического канала используют тонкие слои полимерных лаков или стекол, обладают сравнительно невысокой электрической прочностью изоляции.

К.П.Д. оптрона, его срок службы, а также ряд других параметров в значительной степени определяются излучателем, и именно поэтому совершенствованию светодиодов уделяется большое внимание. В то же время, оптрон как элемент электронной схемы, характеризуется не столько излучателем, сколько типом используемого фотоприемника.

### 3.2 Параметры, характеризующие работу оптронов

Элементарный оптрон является четырехполюсным прибором, свойства которого определяются прежде всего тремя основными характеристиками – входной, передаточной и выходной. Входной является вольтамперная характеристика излучателя, а выходной – соответствующая характеристика фотоприемника (при заданном токе на входе оптопары).

Передаточной характеристикой называют зависимость тока  $I_2$  на выходе оптрона от тока  $I_1$  на его входе; в общем случае эта зависимость является нелинейной, что приводит к некоторому искажению формы передаваемого сигнала.

Суммарное быстродействие оптопары характеризуют временем переключения:

$$t_n = t_1 + t_2 \quad (8)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – соответственно времена нарастания и спада сигнала на выходе оптрона. Время переключения неодинаково у разных типов оптопар, оно зависит также от режимов их работы и может составлять от  $10^{-9} \div 10^{-1}$  с. Помимо времен переключения, быстродействие некоторых классов оптронов может быть задано граничной частотой  $f_{гр}$ . В зависимости от типа оптрона  $f_{гр} = 0,005 \div 10$  МГц.

Важным параметром является статический коэффициент передачи по току.

$$K_I = I_2 / I_1 \quad (9)$$

В общем случае, особенно при высоких температурах, когда существует темновой ток  $I_T$  на выходе фотоприемника,

$$K_I = (I_2 - I_T) / I_1 \quad (10)$$

Для большинства типов оптопар  $K_I$  является паспортным параметром. Он может составлять от 0,5% (диодные оптопары) до 1000% (транзисторные оптопары с составным фототранзистором) от номинала.

Конструктивно – технологическое оформление оптронов (рис.15) определяется требованиями по оптимизации тех или иных параметров этих приборов (1 – излучатель, 2 – фотоприемник, 3 – оптический канал, 4 – корпус, 5 – электрические выводы, 6 – отражатель).

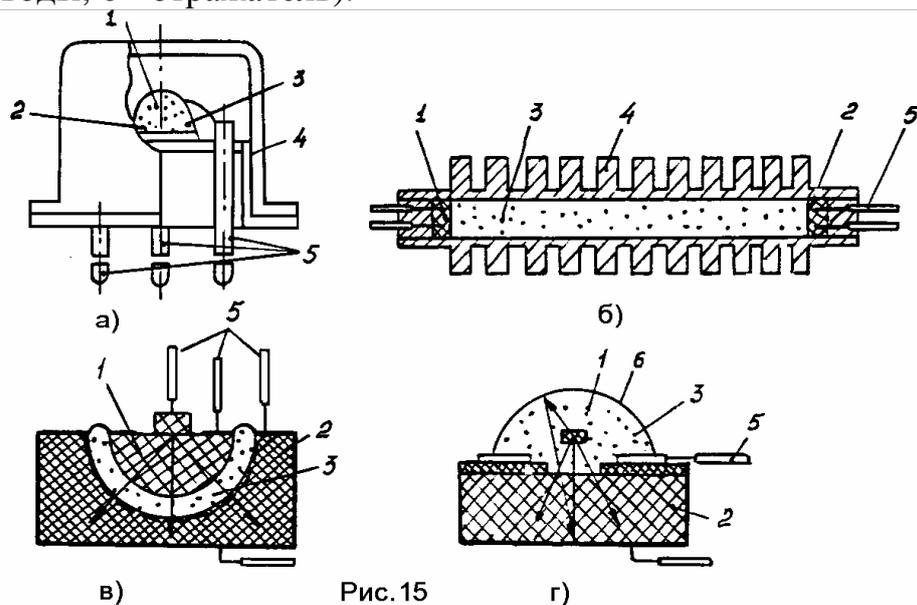


Рис.15

### 3.3. Резисторные оптопары

В качестве фотоприемников оптопар этого типа используют фоторезисторы на основе  $CdS$  и  $CdSe$ . При засветке фоторезисторов их сопротивление снижается от  $R_T$  (темного) до  $R_{СВ}$  (при освещении). Одним из основных параметров резисторных оптопар является отношение этих сопротивлений; значение  $R_T/R_{СВ}$  может достигать  $10^4 \div 10^7$ .

Фоторезисторы обладают, как правило, большой инерционностью, именно поэтому в фоторезисторных оптопарах в качестве источников излучения широко применяют миниатюрные лампы накаливания, к достоинствам которых следует отнести хорошую воспроизводимость параметров, большой срок службы, малую стоимость. Невысокое быстродействие (время переключения – порядка  $1 \div 10^{-2}$  с) ламп накаливания в оптопарах этого типа не является их недостатком, поскольку общее время переключения (до  $10^{-1}$  с) определяется фотоприемником. Кроме ламп накаливания в резисторных оптопарах используют светодиоды на основе *GaP*, спектр излучения которых хорошо согласован со спектрами возбуждения фотопроводимости *CdS* – и *CdSe* – фотоприемников.

Некоторые характеристики резисторных оптопар представлены на рис. 16. Увеличение тока  $I_1$  на входе оптрона сопровождается увеличением светового потока излучателя, в результате чего  $R_{CB}$  снижается (рис. 16,а). Повышение температуры  $T$  ведет к снижению подвижности свободных носителей заряда в фоторезисторе, увеличению  $R_{CB}$ , а следовательно, к спаду  $I_2$  при том же напряжении  $U_2$  на выходе (рис.16,б).

Инерционность резисторных оптопар сказывается на их частотных характеристиках, что иллюстрируется на рис. 16в (по вертикали отложен коэффициент передачи по току).

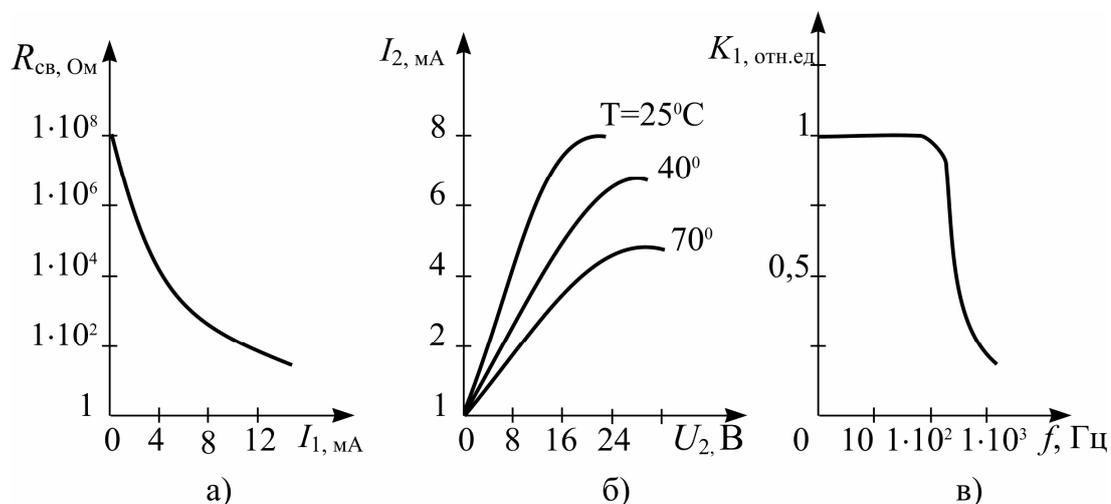


Рис.16.

Достоинствами резисторных оптопар, определяющими их широкое применение в различных типах оптоэлектронных схем, являются линейность и симметричность выходной характеристики (независимость от полярности включения фоторезистора), отсутствие фото – э.д.с. , высокое значение достижимого напряжения на выходе (до 250 В и темнового сопротивления  $R_T \approx 1 \cdot 10^6 \div 1 \cdot 10^{11}$  Ом.

### 3.4 Диодные оптопары.

Оптопары этого типа изготавливают на основе кремниевых p-i-n – фотодиодов и арсенид-галлиевых светодиодов.

На рис.17 изображены типичные графики зависимостей коэффициента передачи по току  $K$  от входного тока  $I_1$ , напряжения на выходе  $U_2$  и температуры  $T$ . Из (рис.17,а.) следует, что у диодных оптопар  $K_I$  остается практически постоянным в широком диапазоне входных токов, что обусловлено постоянством в этом диапазоне квантового выхода  $\eta_k$  светодиода. Подъем в области малых и спад в области больших входных токов (когда начинает сказываться разогрев прибора) также определяется поведением  $\eta_k$ .

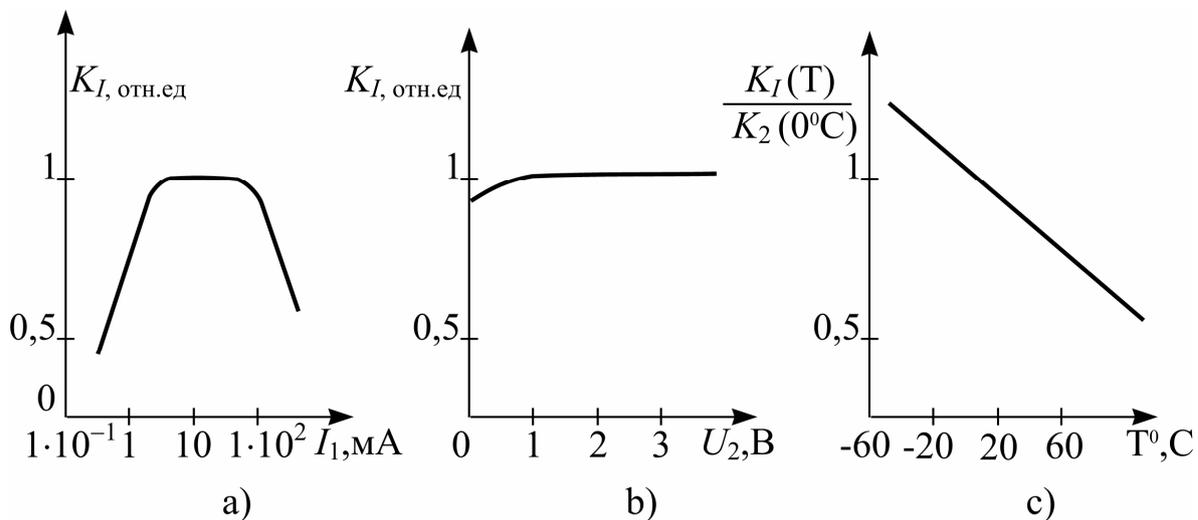


Рис.17.

### 3.5 Транзисторные оптопары

К этому классу приборов относятся транзисторные оптопары (приемником излучения служит фототранзистор), а также оптроны с составным фототранзистором.

Так же как и в случае диодных оптопар, материалом фотоприемников чаще всего является кремний; излучателями в таких приборах служат арсенид – галлиевые светодиоды.

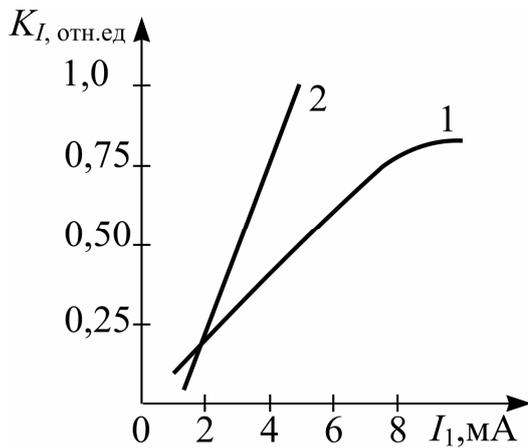


Рис.18.

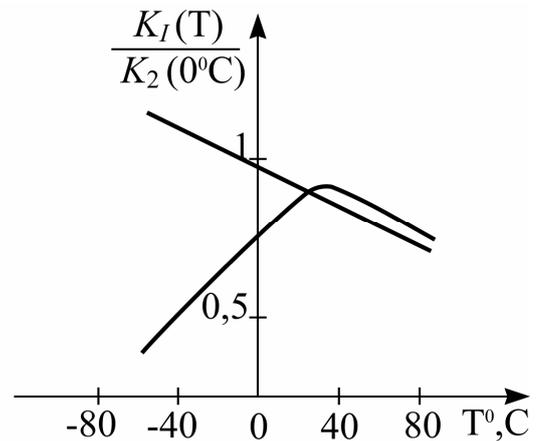


Рис.19.

Транзисторные оптопары привлекают внимание возможностью управления коллекторным током как оптическими методами, так и электрическими. Эти приборы позволяют получать высокие значения коэффициента передачи по току и соответственно большие  $I_2$  (чем они выгодно отличаются от диодных оптопар) при удовлетворительном быстродействии.

На рис.18 приведены типичные зависимости  $K_I$  от входного тока для транзисторной (кривая 1) оптопары, и оптопары с составным фототранзистором (кривая 2). Сравнение этого рисунка с рис. 17а. показывает, что характеристики таких оптопар сильно отличаются от полученных для диодного оптрона. Это связано с тем, что коэффициент усиления транзистора зависит от тока базы и поэтому не является постоянной величиной.

Температурные зависимости  $K_I$  транзисторного оптрона при больших (кривая 1) и малых (кривая 2) входных токах представлены на рис. 19. Видно, что при больших  $I$  коэффициент передачи по току с изменением температуры ведет себя примерно также как и в случае диодных оптопар. В общем случае характер кривых  $K_I(T)$  определяется зависимостями от температуры квантового выхода как светодиода, так и фототранзистора.

### 3.6 Тиристорные оптопары

Тиристорные оптопары используют в качестве ключей для коммутации сильноточковых и высоковольтных цепей как радиоэлектронного ( $U_2=50\div 600\text{В}$ ,  $I_2=0,1\div 10\text{А}$ ), так и электротехнического ( $U_2 =100\div 1300\text{В}$ ,  $I_2 =6,3\div 320\text{А}$ ), назначения. Важным достоинством этих приборов является то, что, управляя

значительными мощностями в нагрузке, они тем не менее по входу совместимы с интегральными микросхемами.

В зависимости от гарантируемых значений коммутируемых напряжений и токов, а также от времени переключения тиристорные оптопары подразделяются на большое число групп. В целом типичные значения  $t_1$  составляют 10-30 мс,  $t_2=30\div 250$  мкс.

Поскольку тиристорные оптопары работают в ключевом режиме, то параметр  $K_I$  для них лишен смысла. Поэтому удобнее характеризовать такие оптопары номинальным значением  $I_1$  при котором открывается фототиристор, а также – максимально допустимым входным током помехи (максимальным значением  $I_1$  при котором еще не происходит включение фототиристора). Значение силы номинального входного тока для разных типов тиристорных оптопар лежит в пределах  $20 \div 200$  мА, максимально допустимый ток помехи для оптопары АОУ103, например, равен 0,5 мА.

### **ПРИБОРЫ, используемые в работе**

1. Лабораторный макет
2. Вольтметр
3. Осциллограф

### **Описание лабораторной установки**

В корпусе лабораторного макета смонтированы испытуемые фотодвухполюсники (фотодиод ФД 3; фотоэлемент СЦВ 3; фотосопротивление ФСК П1) и оптроны (диодная, ранзисторная, и тиристорная оптопара).

Принципиальная схема приведена в приложении 1. Установка питается от сети переменного тока 220В (включается в сеть с помощью шнура) и постоянного источника  $\pm 5$ В (подключается к источнику с помощью разъема).

Постоянное напряжение для питания исследуемых фотодвухполюсников снимается с выпрямителя на диоде VD1, емкость C1 служит для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения. Напряжение на фотоприборе плавно регулируется потенциометром ( $U_a$  ФТД)

Вакуумный элемент питается полным выпрямленным напряжением. Для питания полупроводниковых фотоэлектрических приборов избыток напряжения гасится на резисторе R1. Ток исследуемых приборов регистрируется стрелочным микроамперметром, расположенным на лицевой панели макета.

Переключатель T2 “Оптоны – фотоэлементы” переключает измерительный прибор в различные цепи.

Чувствительность его можно изменять переключателем A3 “Пределы шкалы”, присоединяя к прибору шунты.

При исследовании полупроводникового фотодиода в режим фото – ЭДС диод отключается от источника питания.

Осветительная часть представляет собой лампочку накаливания Л1, мощностью 25В, включаемую переключателем SA4 “Освещенность -50%, 100%, при этом изменится величина накала лампы”.

Для снятия спектральных характеристик используются лабораторные светофильтры, смонтированные на вращающемся барабане. На лицевой панели макета имеется указатель цвета светофильтра.

Постоянное напряжение  $\pm 5В$  служит для питания генератора линейного пилообразного напряжения, который собран на операционных усилителях DA1, DA2 и оптронах. Для создания необходимой нагрузочной способности данный генератор снабжен усилителем по току, в качестве которого используется каскад эмиттерного повторителя. Напряжение генератора пилообразного напряжения, используется для развертки картинка на экране осциллографа, а также поступает на входную цепь оптронах.

Переключатель SA1 “Выбор элемента” служит для включения питающих напряжений на элемент; выбор которого осуществляется с помощью переключателя SA2 “Тумблер T1” Вх.характеристика – Вых.характеристика”. Позволяет на экране осциллографа входную и выходную характеристики производится подключение генератора пилы по входной цепи диодной оптопары и входа “ $\perp$ ” осциллографа к сопротивлению R11. Когда переключатель T1 стоит в положении “Вых.характер” генератор пилы не подключается ко входной цепи. Меняя резисторами R10 и R'10 “Ток управл. оптопары” величину управляющего тока можно получить семейство выходных ВАХ оптронах. Контроль и отсчет производится по шкале микроамперметра с учетом установленных пределов шкалы. Сопротивление R11, R13, R16 является ограничительными и подобраны с учетом максимального входного тока для каждого оптрона.

Калибровка выходного тока осуществляется путем деления напряжения отсчитанного по осциллографу (ось Y) на соответствующее сопротивление входной цепи (сопротивление R12, R15, R18).

## Порядок выполнения работ

Присоединить ламповый вольтметр и осциллограф к гнездам на лицевой панели макета и включить в сеть приборы и макет.

## Исследование фотоэлементов

Установить переключатели в следующее положение:

SA1 «Выбор элемента» – в положение «фотоэлемент».

SA2 «Выбор элемента» – в положение «СЦВ»

T2 «Оптроны – фотоэлементы» - в положение «Фотоэлементы»

**Задание 1.** Снять вольтамперную характеристику фотоэлемента СЦВ. Характеристика снимается при освещении фотоэлемента белым светом (указатель спектра – в положение «белый») при двух значениях освещенности:  $\Phi_1$  – 50%,  $\Phi_2 = \Phi_{\max}$  (100%). Плавно менять напряжение на фотоэлементе регулятор « $U_a$  ФТД» от 0 до 20В, записывая показания тока.

Пределы шкалы токового индикатора 100 мкА.

**Задание 2.** Снять спектральную характеристику фотоэлемента СЦВ  $I_{\Phi} = f(\alpha)$ . Установить напряжение на фотоэлементе.

$U_a = 200$ В световой поток  $\Phi_{\max}$ . Меняя светофильтры, снять показания тока. Длины волн, соответствующие максимуму прозрачности каждого светофильтра, приведены ниже.

Цвет	Красный	Оранжевый	Желтый	Зеленый	Фиолетовый
$\lambda \text{ \AA}$	7700	6470	5880	5500	4550

## Исследование фотосопротивления

**Задание 3.** Снять вольтамперную характеристику фотосопротивления.

$$I_{\Phi} = f(U) \text{ при } \Phi = const$$

Переключатель SA2 установить в положение «ФСР». Менять напряжение на фоторезисторе. Снять показания тока. Характеристику снимать для трех значений светового потока  $\Phi = 0$ ,  $\Phi = 50\%$ ,  $\Phi_{\max} = 100\%$  без светофильтров (при белом свете).

## Исследование фотодиода

**Задание 4.** Снять световую характеристику фотодиода  $I_{\Phi} = f(\Phi)$  при  $U = 10$ В. Переключатель SA2 установить в положение «ФД». Изменяя освещенность от 0 до  $\Phi_{\max}$ , записывать показания тока.

**Задание 5.** Снять вольтамперные характеристики фотодиода  $I_{\Phi} = f(U)$  при  $\Phi = const$ . Изменяя напряжение на фотодиоде, записывать показания тока.

Характеристику снимать для трех значений светового потока:  $\Phi = 0$  (темновая характеристика),  $\Phi = 0,5\Phi_{\max}$  и  $\Phi = \Phi_{\max}$ .

**Задание 6.** Снять зависимость фото-ЭДС диода ФД-3 от величины светового потока:  $E_{\text{ФД}} = f(\Phi)$ . Установить переключатель SA2 в положение “ФЭДС”. Изменяя освещенность записывать значения фото-ЭДС по показаниям лампового вольтметра, подключенного к макету (шкала вольтметра 0,3 В).

Проверить правильность подключения осциллографа к клеммам на макете.

### Исследование оптронов

Установить переключатели в следующие положения:

SA1 «Выбор элемента» – в положение “Оптроны”.

SA2 «Выбор элемента» – в положение “Диод”.

T1 «Вх. характеристика – Вых. характеристика» в положение «Вх. характеристика».

T2 «Оптроны – фотоэлементы» - в положение “Оптроны»

Проверить правильность подключения осциллографа к клеммам на макете.

**Задание 7.** Исследование диодной оптопары,

а) получить входную вольтамперную характеристику диода на экране осциллографа. Зарисовать в масштабе, определить напряжения отпирания и величину тока (токоусъемное сопротивление  $R11=1$  кОм)

б) получить выходную характеристику на экране осциллографа, для чего переключатель T1 установить в положение “Вых. характеристика”.

Меняя величину управляющего тока получить на экране осциллографа семейство выходных характеристик. Определить выходные токи (величина токоусъемного сопротивления  $R12 = 10$ кОм). Построить передаточную характеристику:  $I_{\text{ВЫХ}} = f(I_{\text{ВХ}})$ . Определить  $K_I$ .

**Задание 8.** Исследование транзисторной оптопары.

Переключатель SA2 установить в положение “Транзистор”.

Меняя величину управляющего тока, получить на экране осциллографа семейство выходных характеристик. Определить величину выходных токов (токоусъемное сопротивление  $R15 = 43$  Ом). По полученным данным построить зависимость:  $I_{\text{ВЫХ}} = f(I_{\text{ВХ}})$ . Определить  $K_I$ .

**Задание 9.** Исследование тиристорной оптопары.

Переключатель SA2 установить в положение “Тиристор”.

Меняя величину управляющего тока, просмотреть на экране осциллографа выходную характеристику тиристора. Определить номинальные значения входного тока  $I_{\text{ВХ}}$ , при котором открывается фототиристор, а также максимально допустимый входной ток помехи, при котором еще не происходит включение тиристора.

## Содержание отчета.

По данным задания 2 построить семейство вольт-амперных характеристик фотоэлементов.

Графическим методом по результатам предыдущего графика построить световую характеристику фотоэлемента для  $U = 150\text{В}$ .

Определить интегральную чувствительность фотоэлемента.

По данным измерений задания 2 построить спектральную характеристику фотоэлемента  $I_{\Phi} = f(\lambda)$  при  $U = \text{const}$ .

По результатам измерений задания 3 построить семейство вольтамперных характеристик фоторезистора ФСК-3:  $I_{\Phi} = f(U)$  при  $\Phi = \text{const}$ .

По результатам измерений задания 4 построить световую характеристику ФД-3:  $I_{\Phi} = f(\Phi)$  при  $U = \text{const}$ .

Определить графическую интегральную чувствительность фотодиода ФД-3:  $K_{\Phi} = I_{\Phi} / \Phi$

Построить семейство вольт-амперных характеристик фотодиода ФД-3 по результатам задания 5.

По результатам измерений задания 6 построить характеристику фото-ЭДС от светового потока.

Нарисовать в масштабе входную и выходную характеристику транзисторной оптопары. Определить коэффициент передачи по току.

Нарисовать в масштабе семейство выходных характеристик транзисторной оптопары. Определить коэффициент передачи по току  $K_I$ . Построить зависимость  $K_I = f(I_{\text{вх}})$ .

Нарисовать в масштабе выходную характеристику включенного тиристора. Определить ток включения тиристора и максимально допустимый входной ток помехи.

## Контрольные вопросы

1. Поясните принцип действия фоторезистора. Каковы его основные характеристики и параметры.

2. Нарисуйте и поясните вольтамперную характеристику перехода под действием светового потока.

3. Поясните режим работы перехода под действием светового потока.

4. Поясните конструкцию, принцип действия полупроводникового фотодиода.

5. Нарисуйте эквивалентную схему фотодиода и поясните его основные параметры.

6. Какие полупроводниковые приборы обладают свойством усиливать фототок?

7. Поясните принцип действия фототранзистора.

8. Что такое фототиристор, поясните его принцип действия и основные параметры.

9. Что такое полупроводниковый светодиод? Поясните принцип действия светодиодов.
10. Поясните спектральную, яркостную и вольтамперную характеристики светодиодов.
11. Что такое оптоэлектронная пара. Схематически нарисуйте возможные конструкции и поясните принцип их действия?
12. Нарисуйте и поясните структурную схему оптопары.
13. Поясните, что означает оптический канал оптопары и каковы его свойства.
14. Поясните, что означает входные и выходные параметры оптопар.
15. Чем определяется коэффициент передачи по току оптопары (резисторной, диодной, транзисторной)?
16. Поясните принцип действия оптопары и ее основные характеристики (резисторной, диодной, транзисторной, тиристорной).
17. Чем характеризуется быстродействие оптопары?
18. Поясните частотную характеристику оптопары. Что такое граничная частота?

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Батушев В. А. Электронные приборы, М. : Высш. шк., 1980.
2. Н.А. Аваев, Г.Г.Шишкин Электронные приборы, 1966 г.