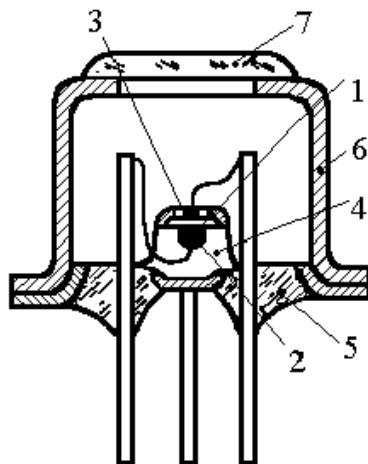


ФОТОТРАНЗИСТОР и ФОТОРЕЗИСТОР

Фототранзистор - это управляемый излучением прибор с двумя или большим числом взаимодействующих между собой электрических переходов. Его применяют в качестве чувствительного к излучению элемента оптоэлектронных пар и фотоприемных устройств, первичного преобразователя измерительных информационных систем, элемента приемного модуля волоконно-оптических линий связи средней пропускной способности и др. Различают биполярные и полевые фототранзисторы. К фототранзисторам также относится фототиристор.

Биполярный фототранзистор. Устройство и принцип действия.

Один из возможных вариантов конструкции фототранзистора показан на



Устройство фототранзистора.
1-пластина n-Ge; 2-эмиттер; 3-коллектор;
4-кристаллодержатель; 5-изолятор;
6-корпус; 7-стеклянная линза.

Рис. 1

Рис.1. Как видно из этого рисунка, фототранзистор отличается от обычного транзистора лишь прозрачным окном в корпусе; через него световой поток падает на пластину полупроводника, служащую базой, в центре которой путем вплавления создан коллекторный переход.

Возможны и другие варианты расположения электродов, например кольцеобразный коллектор на освещаемой поверхности базы.

Устройство и схема включения биполярного фототранзистора также показаны на Рис.2.а.

Фототранзистор состоит из:

- 1 - эмиттерной области p^+ - типа;
- 2 - области базы n - типа, большая часть которой пассивна и открыта световому потоку;
- 3 - широкой коллекторной области p - типа.

Пассивная часть базы расположена на Рис.2.а слева от штрих пунктирной линии. Фототранзистор, как правило, включается по схеме ОЭ с резистором нагрузки R_n в коллекторной цепи (Рис.2.а). Входным сигналом фототранзистора является модулированный световой поток, а выходным - изменение напряжения на его коллекторе.

Рассмотрим принцип работы фототранзистора в схеме с разорванной це-

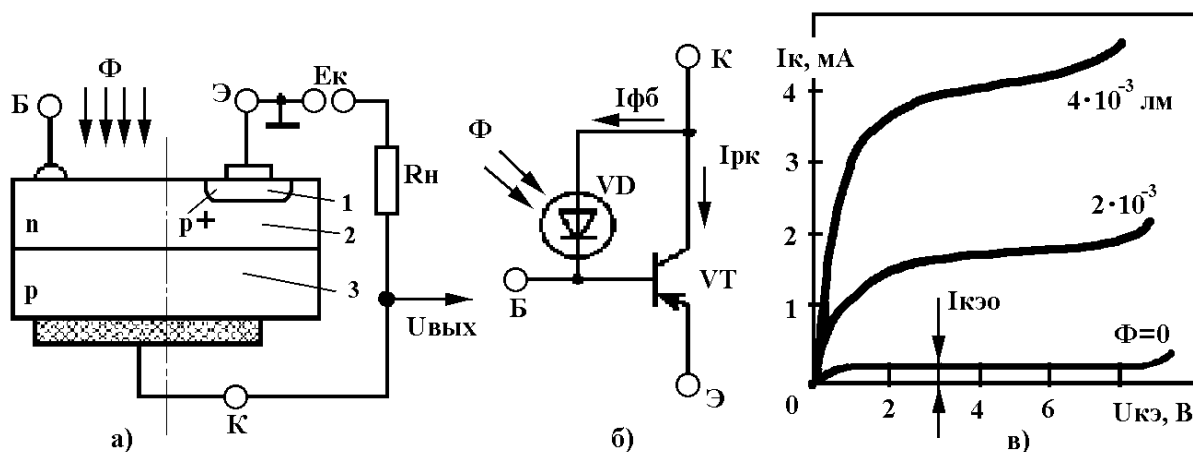


Рис.2

пью базы. Оптический сигнал генерирует в коллекторном переходе и области пассивной базы носители. Эти носители диффундируют в базу к коллекторному переходу и разделяются его электрическим полем. Не основные носители создают фототок коллекторного перехода, а основные накапливаются в базе и компенсируют заряд неподвижных ионов примесей на границе эмиттерного перехода. Потенциальный барьер перехода снижается, что усиливает инжекцию¹ носителей из эмиттера в базу. Инжектированные носители диффундируют через базу к коллекторному переходу и втягиваются его электрическим полем в область коллектора. Ток инжектированных носителей, а соответственно и образованный ими коллекторный ток многократно превышает фототок оптически генерируемых носителей.

Общий ток коллектора - это сумма фототока $I_{фб}$ и тока $I_{кр}$ инжектированных эмиттером дырок, прошедших коллекторный переход.

¹ **Инжекция** – это механизм создания неравновесных носителей, путем введения их в данную область полупроводника извне, из другой, соседней области (например, инжекция электронов из области n-типа в область p-типа в p-n переходе).

Коэффициент усиления фототока:

$$M = (I_{фв} + I_{кр}) / I_{фб} = \beta + 1, \text{ если } R_n \rightarrow 0, \quad (1)$$

где β - статический коэффициент передачи по току транзистора в схеме с ОЭ. Усиленный в M раз фототок создает падение напряжения на резисторе нагрузки R_n , изменяя напряжение коллектора на:

$$\Delta U \approx (\beta + 1) I_{фб} R_n, \quad (2)$$

Из этого соотношения следует, что фототранзистор можно представить в виде эквивалентного фотодиода VD и усилительного транзистора VT (Рис.2.б). Эквивалентный фотодиод образован пассивной базой и областью коллектора слева от штрих-пунктирной линии на Рис.2.а, структура усилительного транзистора расположена справа от этой линии. Транзистор увеличил чувствительность эквивалентного фотодиода в $(\beta + 1)$ раз.

Вывод базы B фототранзистора иногда используется для подачи смещения при выборе рабочей точки на входной и выходной характеристиках транзистора и обеспечения ее температурной стабилизации.

Семейство выходных характеристик фототранзистора в схеме с ОЭ приведено на Рис.2.в. Фототок образован генерируемыми в области базы неравновесными носителями².

Характеристики фототранзистора.

Световая характеристика фототранзистора - это зависимость тока коллектора от светового потока $I_k = f(\Phi)$. Она линейна только при малых потоках. С увеличением светового потока и ростом концентрации неравновесных носителей в базе повышается вероятность их рекомбинации³, снижаются коэффициенты переноса, и инжекции фототранзистора. Прямо пропорциональная зависимость коллекторного тока от светового потока нарушается.

Большинство параметров биполярного фототранзистора аналогично по физическому смыслу параметрам фотодиодов. Кроме того, фототранзистор характеризуется рабочим напряжением питания, емкостями переходов C_k и C_z ,

² **Неравновесные носители** возникают под действием внешнего электромагнитного излучения, вызывающего переход электронов из валентной зоны в зону проводимости.

³ **Рекомбинация** – это процесс переходов электронов из зоны проводимости в валентную зону с выделением энергии, равной ширине запрещенной зоны.

статическим коэффициентом усиления по току и другими параметрами обычного транзистора.

Вольт-амперные характеристики фототранзистора (Рис.3) напоминают выходные характеристики обычного транзистора в схеме ОЭ, но параметром здесь служит не ток I_K , а световой поток Φ .

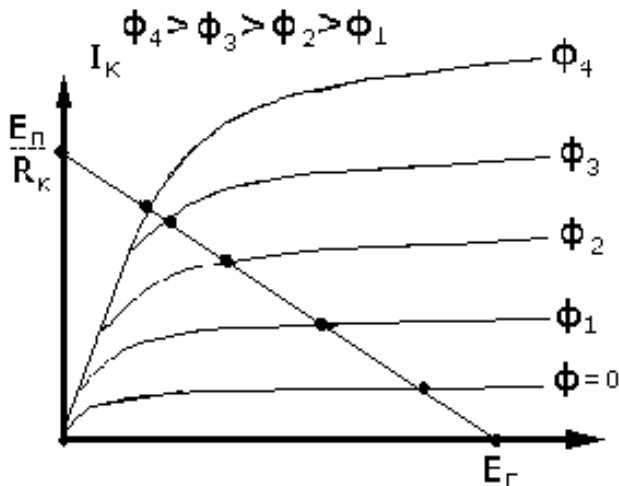


Рис. 3

Крутой начальный участок этих характеристик соответствует режиму насыщения: при малых $U_{КЭ}$ коллекторный переход, как и в биполярном транзисторе, за счет накопления дырок в коллекторе открывается. Наклон характеристик к оси абсцисс в их пологой части объясняется, так же как и для биполярного транзистора, эффектом модуляции ширины базы.

Частотные свойства фототранзисторов определяются в основном диффузионным движением⁴ носителей в базе прибора и процессами заряда емкостей переходов.

С увеличением частоты модуляции светового потока фототок уменьшается так же, как и в фотодиодах (Рис.4).

Одним из важнейших параметров фототранзистора служит **коэффициент усиления по фототоку фототранзистора ($K_{уф}$)** - отношение фототока коллектора фототранзистора при отключенной базе к фототоку освещаемого p-n перехода, измеренному в диодном режиме:

$$K_{уф} = 1/(1 - h_{21Э}), \quad (3)$$

Токовая чувствительность фототранзистора - это отношение изменения электрического тока на выходе фототранзистора к изменению потока излу-

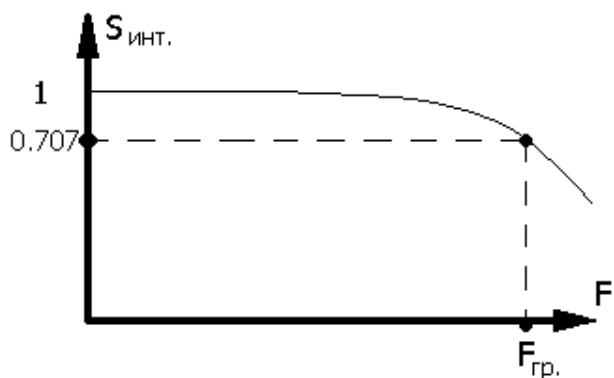


Рис. 4

⁴ **Диффузионное движение** – это направленное движение свободных носителей, вызванное их неравномерным распределением в объеме полупроводника.

чения при холостом ходе на входе и коротком замыкании на выходе по переменному току. Для схемы с общим эмиттером токовая чувствительность равна:

$$h_{21Э} = \Delta I_K / \Delta \Phi \quad | \text{ при } I_6 = 0 \quad (4)$$

Эмиттерный переход биполярного фототранзистора включен в прямом направлении. Его удельная емкость около 10^5 пФ·см⁻². Постоянная времени заряда емкости эмиттерного перехода увеличивается с ослаблением интенсивности светового потока. При малых световых потоках она определяет в основном инерционность фототранзистора. При больших световых потоках на инерционность фототранзистора влияют время диффузии носителей в базе и емкость коллекторного перехода. Поэтому для фототранзистора выбирают материалы с высокой подвижностью носителей, используют структуру с внутренним электрическим полем в базе или с тонкой базой. Уменьшать емкость коллекторного перехода снижением концентрации примесей в области коллектора удастся лишь до некоторого предела. Сокращать для этой цели площадь эквивалентного фотодиода нецелесообразно, так как при этом падает чувствительность фототранзистора.

Для повышения чувствительности фототранзистора следует увеличивать толщину базы, время жизни носителей⁵ в базе и, следовательно, выбирать материалы с высоким удельным сопротивлением. Но для повышения его граничной частоты толщину базы и время жизни носителей необходимо уменьшать.

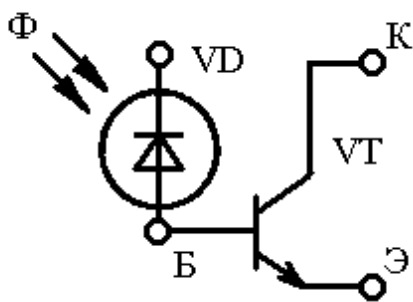


Рис. 5

Разрешает противоречие между быстродействием и чувствительностью структура фотодиод - транзистор, эквивалентная схема которой показана на Рис.5. Оба элемента структуры изготовлены в одном кристалле. Параметры фотодиода выбирают из условий достижения максимальной чувствительности и быстродействия, а параметры транзистора - максимальной гра-

⁵ **Время жизни носителей** — представляет собой среднее время от момента появления носителя до его рекомбинации. Оно характеризует скорости изменения концентраций, а, следовательно, определяет быстродействие полупроводниковых приборов.

ничной частоты и усиления. В совокупности оба элемента эквивалентны быстродействующему фототранзистору с высоким коэффициентом усиления.

Полевой фототранзистор.

Устройство и схема включения полевого фототранзистора с управляющим p-n переходом показаны на Рис.6.а

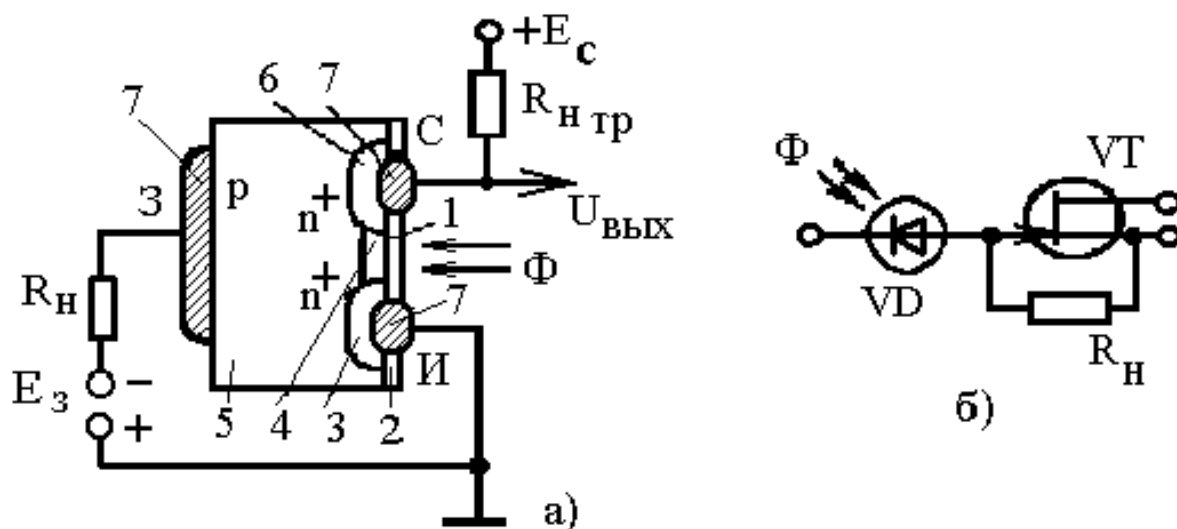


Рис.6

где: 1 - просветляющее покрытие; 2 - диэлектрический слой; 3 - область истока n^+ - типа; 4 - канал n- типа; 5 - область затвора p- типа; 6 - стоковая область n^+ - типа; 7 - выводы прибора; R_H - резистор нагрузки в цепи затвора; $R_{H.tr}$ - резистор нагрузки фототранзистора.

Световой поток генерирует неравновесные носители в области затвора 3 и p-n перехода затвор-канал. Электрическое поле этого перехода разделяет неравновесные носители. В цепи затвора появляется фототок I_Φ . Он создает на резисторе R_H падение напряжения:

$$\Delta U_3 = I_\Phi R_H, \quad (5)$$

Напряжение на затворе увеличивается, ток стока изменяется на:

$$\Delta I_c = S \Delta U_3 = S I_\Phi R_H, \quad (6)$$

где S - крутизна стокзатворной характеристики полевого транзистора. Проводимость канала возрастает, и соответственно уменьшается напряжение стока на:

$$\Delta U_c = S I_\Phi R_H R_{H.tr}, \quad (7)$$

Изменение напряжения стока является выходным электрическим сигналом схемы. Таким образом, полевой фототранзистор эквивалентен фотодиоду

“затвор-канал” и усилительному полевому транзистору с управляющим р-п переходом (Рис.6.б).

В эквивалентной схеме полевого фототранзистора (Рис.7) источники $I_{\Phi\text{н}}$ и $I_{\Phi\text{с}}$ моделируют фототоки р-п переходов “исток-затвор” и “сток-затвор”; источник $S\Delta U_3$ - усиление в транзисторе; резистор $r_{\text{диф}}$ - дифференциальное выходное сопротивление транзистора; резисторы $R_{\text{н}}$, $R_{\text{с}}$ и конденсаторы $C_{\text{н}}$, $C_{\text{с}}$ учитывают сопротивление и емкости переходов между областями “исток-затвор”, “сток-затвор”. Резисторы $R_{\text{пс}}$, $R_{\text{пи}}$, $R'_{\text{пс}}$, $R'_{\text{пи}}$ с учетом сопротивления омических контактов определяют последовательно включенные сопротивления областей между выводом затвора и областью стока, выводом затвора и областью истока, выводом истока и областью затвора, выводом стока и областью затвора. Для источника тока в выходной цепи фототранзистора можно записать:

$$S\Delta U_3 = SR_{\text{н}}(I_{\Phi\text{к}} + I_{\Phi\text{с}} + I_{\Phi\text{н}}) = SR_{\text{н}}I_{\Phi}, \quad (8)$$

где $I_{\Phi\text{к}}$ - фототок р-п перехода “канал-затвор”.

При коротком замыкании цепи “затвор-исток” объемные сопротивления $R_{\text{пи}}$, $R'_{\text{пи}}$, $R_{\text{пс}}$ выполняют роль резисторов нагрузки. Постоянными времени $(R_{\text{пи}} + R'_{\text{пи}})C_{\text{н}}$ и $(R_{\text{пс}} + R'_{\text{пс}})C_{\text{с}}$, а также временем пролета носителей в канале определяется предельное быстродействие фототранзистора.

Параметры полевого фототранзистора аналогичны по физическому смыслу параметрам биполярного.

Структуры полевых транзисторов с р-п переходом и МОП фототранзисторов многообразны. Наибольшие быстродействие и чувствительность у структуры фотодиод - полевой транзистор. Фотодиод совмещен с областью истока полевого транзистора - усилительного элемента. Каждая из составляющих структуры оптимизирована: фотодиод - по чувствительности и быстродействию, полевой транзистор - по граничной частоте и усилению.

Сравнительная оценка параметров фототранзисторов показывает, что наибольшая чувствительность у составного фототранзистора, а максимальное

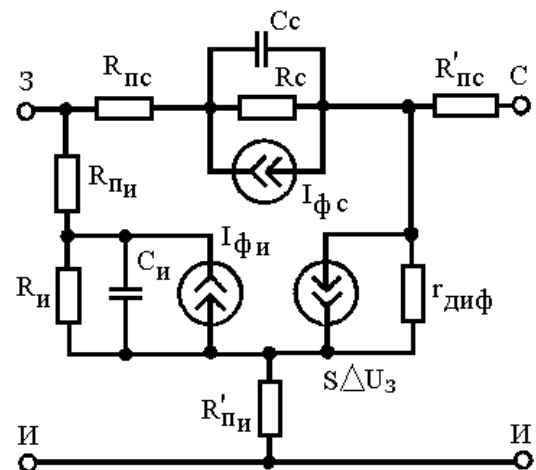


Рис.7

быстродействие при хорошей чувствительности у структуры фотодиод - биполярный транзистор (ФД-БТ). Структура фотодиод - полевой транзистор имеет параметры, близкие к параметрам структуры ФД-БТ. Фототранзисторы уступают фотодиодам по быстродействию, но за счет усиления сигнала имеют высокую чувствительность.

Фототиристор

Фототиристор - это управляемый излучением прибор с тремя или большим числом электрических переходов. Его применяют в системах силовой автоматики для переключения средних и больших мощностей, системах дистанционного управления источниками питания РЭА, электронных реле, оптоэлектронных парах и др.

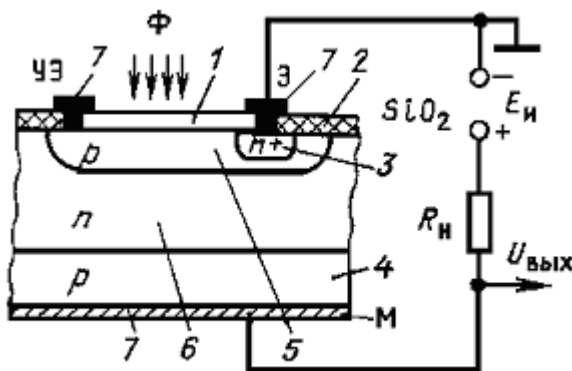


Рис. 8

Устройство фототиристора и схема его включения приведены на Рис.8. Где: **1** - просветляющее покрытие; **2** - диэлектрический слой; **3** и **4** - эмиттерные области соответственно n^+ и p - типа; **5** и **6** - базовые области p - и n - типа; **7** - выводы фототиристора (**УЭ** - управляющий электрод, **Э** - эмиттер); **R_н** - резистор нагрузки.

Оптический сигнал генерирует неравновесные носители в базовых областях **5** и **6** фототиристора, образующих p - n переход, смещенный внешним источником **E** в обратном направлении. Носители разделяются электрическим полем p - n перехода. Через переход протекает фототок, а в базовых областях **5** и **6** накапливаются основные носители, понижающие потенциальный барьер эмиттерных переходов. Снижение потенциального барьера повышает инжекцию носителей из эмиттеров в базы. В дальнейшем процесс включения фототиристора происходит так же, как и при подаче импульса управляющего тока в цепь его базы. Фототиристор остается во включенном состоянии после окончания импульса светового потока. Для его выключения необходимо уменьшить напряжение или ток до значений, меньших напряжения или тока удержания. Сопротивление фототиристора во включенном состоянии единицы и доли Ом, в выключенном - сотни кОм. Фототиристор эквивалентен фотодиоду **VD**, фототок которого управляет включением тиристора **VT**.

Параметры фототиристора:

- пороговый поток $\Phi_{\text{пор}}$ или мощность излучения $P_{\text{пор}}$, обеспечивающие гарантированное включение фототиристора при заданном напряжении источника $E_{\text{и}}$;
- минимальная длительность импульса светового потока $T_{\text{и}}$, обеспечивающая включение тиристора при заданном световом потоке;
- время включения $T_{\text{вкл}}$ и выключения $T_{\text{выкл}}$;
- рабочая длина волны - определяется материалом (обычно кремний) фототиристора
- максимально допустимая скорость нарастания выходного напряжения $dU_{\text{вых}}/dt$
- максимально допустимый выходной ток $I_{\text{вых.макс}}$
- максимальное рабочее напряжение $U_{\text{макс}}$
- пороговая мощность – прямо пропорциональна максимальному рабочему напряжению и максимально допустимой скорости нарастания выходного напряжения.

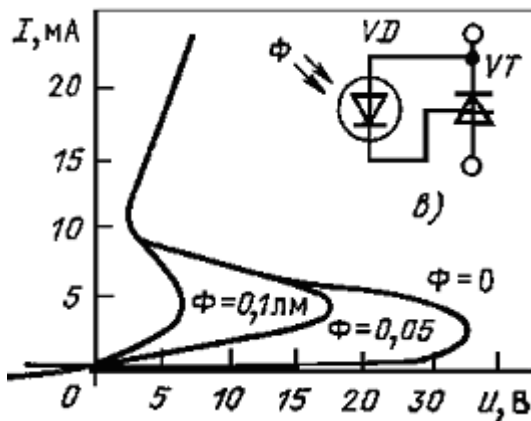


Рис. 9

Семейство ВАХ фототиристора приведено на Рис.9, где в качестве параметра используется световой поток. При потоке $\Phi=0$ ВАХ не отличается от характеристики диодного тиристора. Световой поток и фототок базы тиристора прямо пропорциональны. Поэтому при $\Phi \neq 0$ ВАХ фототиристора аналогичны характеристикам триодного тиристора.

Значение порогового светового потока можно изменять в некоторых пределах током управляющего электрода фототиристора. Этим током можно электрически управлять включением и выключением фототиристора.

Фоторезистор

Фоторезистор – это фотоэлектрический прибор с двумя выводами, сопротивление которого изменяется под действием излучения. Его используют в оптоэлектронных парах, оптических приемниках инфракрасного диапазона, первичных преобразователях измерительных систем и др.

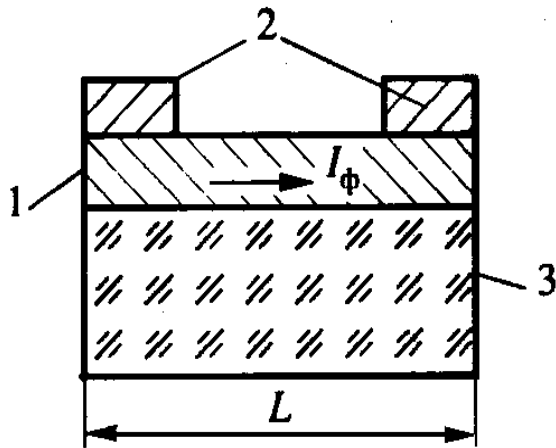


Рис. 10

Фоторезистор представляет собой тонкую пластинку или пленку полупроводника 1 с омическими контактами 2 на двух противоположных концах (Рис.10), к которым подключается электрический источник питания. Полупроводник обычно наносится на стеклянную подложку 3.

Наиболее распространены фоторезисторы на основе CdS и CdSe, спектральные характеристики которых располагаются в видимой области спектра. В Инфракрасном диапазоне работают фоторезисторы из Ge, Si и т.д.

Падающее на поверхность фоторезистора излучение генерирует в нем свободные носители за счет собственного или примесного поглощения.

Параметры и характеристики фоторезистора:

- **коэффициент внутреннего усиления фототока K_R** , определяющий квантовую эффективность прибора. K_R есть отношение числа фотоносителей, проходящих через прибор в единицу времени, к полному числу квантов оптического излучения:

$$K_R = (I_\phi/q) \cdot (1/N_\phi \cdot A), \quad (8)$$

где I_ϕ — фототок; A — площадь поверхности светочувствительного слоя фоторезистора; $N_\phi \cdot A$ — полное число фотонов, падающих на светочувствительную площадку в единицу времени (например, за секунду).

- **постоянная времени релаксации (спада) $\tau_{\text{рел}}$ фотопроводимости**. Этот параметр показывает скорость спада характеристики после прекращения оптического возбуждения, пропорциональна времени жизни электронов. Время же фото отклика определяется временем пролета свободных носителей между контактами прибора, т. е. $t_{\text{пр}}$. Поскольку для фоторезисторов характерны большие расстояния между контактами и слабые электрические поля, их время фото отклика обычно больше, чем у фотодиодов.

- **монохроматическая чувствительность $S_\Phi(\lambda)$** , которая определяется отношением фототока I_Φ к полной мощности излучения $P_{\text{изл}}$, с длиной волны λ , падающей на чувствительную площадку фоторезистора, т. е.

$$S_\Phi(\lambda) = I_\Phi / P_{\text{изл}}(\lambda), \text{ A/Вт} \quad (9)$$

- **токовая и вольтовая чувствительность**,

- **темновое сопротивление $R_{\text{тм}}$** – это сопротивление фоторезистора при нулевом световом потоке.

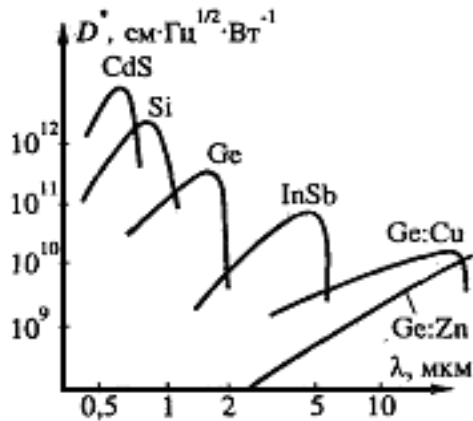


Рис. 11

- **пороговый поток** (пороговая мощность) или обнаружительная способность. На Рис.11 представлены зависимости обнаружительной способности от длины волны. Отметим, что для приема излучения в инфракрасном диапазоне с $\lambda > 2$ мкм фоторезисторы охлаждаются до температуры 77 К и 4,2 К. При таких температурах уменьшаются тепловые эффекты, вызывающие термическую ионизацию и опустошение энергетических уровней,

увеличиваются усиление и эффективность приема излучения.

- **допустимая рассеиваемая мощность $P_{\text{макс}}$** ,

- **рабочее напряжение U_p**

- **предельно допустимое напряжение $U_{\text{макс}}$** ,

- **рабочая длина волны или диапазон рабочих волн.**

- **ВАХ фоторезистора** показана на Рис.12. Она имеет линейный вид, параметром служит световой поток Φ (лм).

- **Частотная характеристика.** Ее вид подобен аналогичной характеристике фототранзистора (см. Рис.4).

Некоторые из перечисленных параметров аналогичны по физическому смыслу параметрам фотодиодов и фототранзисторов.

Фоторезисторы широко используют-

ся для детектирования в инфракрасной области спектра при длинах волн

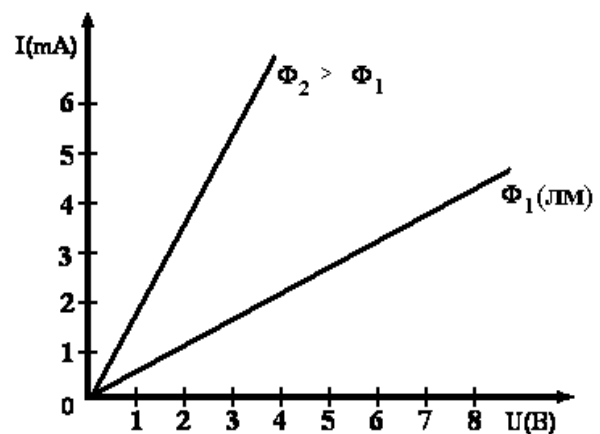


Рис.12

больше нескольких микрон. Для приема слабых сигналов на более коротких волнах в качестве высокочастотных оптических демодуляторов фоторезисторы используются ограниченно. В этих случаях целесообразно применение фотодиодов.