

2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ПРИЕМНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Приемники излучения являются фотоэлектронными устройствами, преобразующими падающий поток излучения в электрические сигналы. Это преобразование описывается рядом характеристик и параметров, оговариваемых техническими условиями и государственными стандартами.

2.1. Параметры фотоприемников.

Параметр - это величина, единственное значение которой характеризует определенное свойство приемника. Параметр может быть измерен непосредственно или определен косвенно по данным измерений других величин. Основными параметрами приемников излучения являются:

- чувствительность или крутизна преобразования S ;
- постоянная времени (инерционность) t ;
- уровень шумов $U_{ш}$ или $I_{ш}$;
- пороговая чувствительность $P_{пор}$;
- удельная обнаружительная способность D^* ;
- динамический диапазон линейности D ;
- темновое сопротивление R_m .

Для оценки конструктивных особенностей приемников служат следующие параметры:

- эффективная фоточувствительная площадь $S_{эф}$;
- рабочее напряжение питания U_p ;
- максимально допустимое напряжение U_{max} ;
- максимальная мощность рассеивания P_{max} ;
- рабочая температура чувствительного слоя приемника T_p .

2.1.1. Чувствительность. Под чувствительностью или крутизной преобразования приемника излучения понимают отношение изменения электрического сигнала на его выходе к падающему потоку. Поскольку на выходе фотоприемника может изменяться ток или напряжение, различают вольттовую чувствительность

$$S_U = \frac{\Delta U}{\Delta \Phi} \left(\frac{B}{Bm} \text{ или } \frac{B}{лк} \right) \quad (2.1)$$

и токовую чувствительность

$$S_I = \frac{\Delta I}{\Delta \Phi} \left(\frac{A}{Bm} \text{ или } \frac{A}{лк} \right) \quad (2.2)$$

Также различают спектральную и интегральную чувствительность. *Абсолютная спектральная чувствительность* S_I это реакция фотоприемника на монохроматический поток излучения и обычно определяется выражением

$$S_I = \frac{\Delta U}{\Delta \Phi_I}, \quad (2.3)$$

где $D\Phi_I$ - изменение монохроматического потока. У большинства приемников излучения спектральная чувствительность изменяется с длиной волны и для какого-то определенного значения I_{max} достигает максимального значения $S_{I_{max}}$. Это значение иногда приводят в паспорте на приемник излучения. Понятие спектральной чувствительности просто и наглядно, но определение его абсолютного значения связано с некоторыми трудностями. Поэтому вместо абсолютной обычно пользуются *относительной спектральной чувствительностью* s_I , которая определяется отношением

$$s_l = \frac{S_l}{S_{l_{\max}}}. \quad (2.4)$$

Относительная спектральная чувствительность обычно приводится в виде графическом виде в относительных единицах, как показано на рис. 2.1. По таким зависимостям можно приближенно судить насколько полно приемник может быть согласован по спектру с детектируемым излучением.

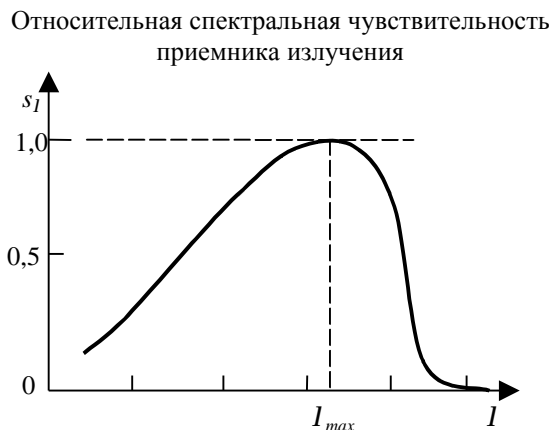


Рис. 2.1.

Интегральная чувствительность. Она определяется для стандартных источников излучения (например, АЧТ при какой-то стандартной температуре)

$$S = \frac{\Delta U}{\Delta \Phi} = \frac{\Delta U}{\int_{I_1}^{I_2} \Delta \Phi(l) dl}, \quad (2.5)$$

где $[I_1, I_2]$ - диапазон спектральной чувствительности приемника излучения, $D\Phi(l)$ - приращение спектральной плотности па-

дающего на приемник излучения от АЧТ.

Приведем пример определения интегральной чувствительности инфракрасного приемника. Для этого используется модель АЧТ, выходное отверстие которого перекрывается турельной диафрагмой с набором отверстий разного диаметра (см. рис. 2.2). Механическая

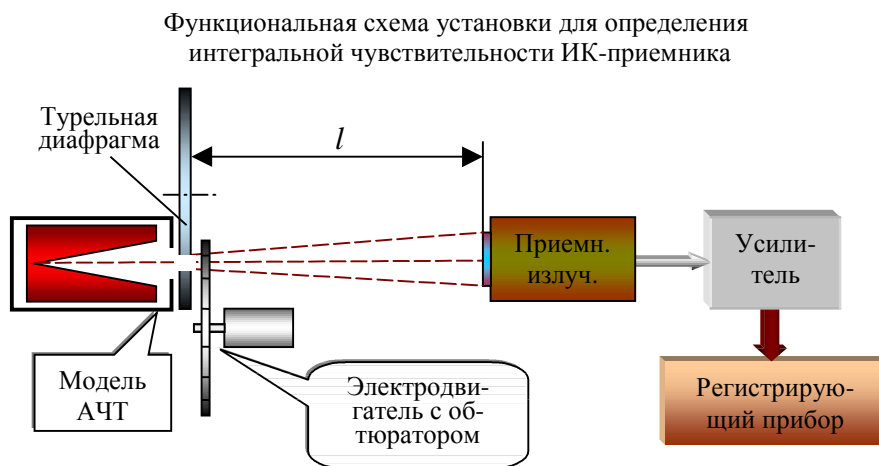


Рис. 2.2.

модуляция потока излучения модели АЧТ осуществляется с помощью дискового обтюратора, установленного на валу электродвигателя.

Промодулированный поток попадает на чувствительную площадку ИК-приемника, вызывая на нагрузочном сопротивлении переменное напряжение с амплитудой U_c . Переменный сигнал обычно подают

на узкополосный усилитель, на выходе которого имеется амплитудный детектор. Амплитудное значение сигнала регистрируют с помощью вольтметра.

Для расчета величины потока, попадающего на чувствительный слой приемника излучения, необходимо принять во внимание, что размеры приемника излучения и диафрагмы модели АЧТ обычно много меньше, чем расстояние между ними l . Тогда можно воспользоваться известной формулой для определения потока, приходящего на входной зрачок оптической системы от АЧТ с видимой площадью $S_{АЧТ}$, расположенного на оси системы:

$$\Phi_{np} = \int_j \int_{\Theta} L_{\Theta} \sin \Theta \cos \Theta \cdot s_{АЧТ} dj d\Theta, \quad (2.6)$$

где L_Q - яркость АЧТ в направлении Q . Для круглой чувствительной площадки приемника пределы интегрирования по Q берутся от 0 до U (U - апертурный угол системы), по j - от 0 до $2p$. Величина апертурного угла приближенно определяется выражением

$$\sin^2 U \approx \frac{D_{np}^2}{4l^2}. \quad (2.7)$$

Поскольку АЧТ является ламбертовским излучателем $L_Q = L = const$, то

$$\Phi_{np} = pLs_{AЧТ} \sin^2 U = \frac{Ls_{AЧТ}s_{np}}{l^2} = \frac{Ms_{AЧТ}s_{np}}{pl^2} = \frac{sT^4 s_{AЧТ}s_{np}}{pl^2}, \quad (2.8)$$

где M - энергетическая светимость модели АЧТ, s_{np} - площадь чувствительного слоя приемника. Для неселективного приемника излучения последнее выражение и будет определять его интегральную чувствительность. Для селективного приемника сигнал, вызываемый падающим на него потоком, может быть записан в следующем виде:

$$U_c = S\Phi_{np} = S \frac{s_{AЧТ}s_{np}}{pl^2} \int_0^\infty M_{IT}s_l dl. \quad (2.9)$$

Тогда его относительная интегральная чувствительность может быть определена как отношение

$$S_{omn} = \frac{\int_0^\infty M_{IT}s_l dl}{\int_0^\infty M_{IT} dl} = \frac{\int_0^\infty M_{IT}s_l dl}{sT^4}. \quad (2.10)$$

Очевидно, что интегральная чувствительность приемника излучения будет зависеть от температуры источника, в данном случае модели АЧТ. Для инфракрасных приемников температура АЧТ выбирается равной 500 К, а для фотоприемников, работающих в видимой области спектра - 2870 К.

Отметим, что в выражение (2.5) для определения интегральной чувствительности входит разность потоков. В рассматриваемом примере $D\Phi$ определяется разностью потоков от модели АЧТ с температурой 500 К и от лопасти обтюратора. В принципе поток, попадающий на приемник при перекрытии выходного отверстия АЧТ лопастью обтюратора, будет определяться равновесным излучением окружающей среды, имеющей температуру T_{cp} . Но поскольку он не модулируется, то разность потоков можно определять с помощью выражения

$$\Delta U_c = S \frac{s_{AЧТ}s_{np}}{pl^2} \left(\int_0^\infty M_l(T_{AЧТ})s_l dl - \int_0^\infty M_l(T_{cp})s_l dl \right) \quad (2.11)$$

т.е. считать, что лопасть обтюратора излучает как АЧТ при температуре окружающей среды. Последнее выражение используется для определения интегральной чувствительности приемника излучения

$$S = \frac{pl^2}{s_{AЧТ}s_{np}} \frac{\Delta U_c}{\left(\int_0^\infty M_l(T_{AЧТ})s_l dl - \int_0^\infty M_l(T_{cp})s_l dl \right)}. \quad (2.12)$$

Отметим, что определение интегральной чувствительности можно вести меняя диаметр выходного отверстия модели АЧТ.

Шумы приемников. Помимо полезного сигнала, на выходе приемника всегда наблюдается хаотический сигнал, со случайными амплитудой и частотой - шум приемника излучения. Уровень шумов ограничивает предельные возможности приемника при регистрации слабых сигналов. Источники шума могут быть как внутренними, так и внешними по отношению к приемнику и системе в целом. По этой причине разработчики ОЭС стремятся свести их к минимуму. Поскольку шумы являются случайными процессами, их описывают такими числовыми характеристиками, как математическое ожидание, диспер-

сия, спектральная плотность мощности и одномерная плотность распределения вероятности. Механизмы возникновения шумов достаточно разнообразны и подробно будут рассматриваться при изучении каждого типа приемников. Здесь же кратко рассмотрим основные виды шумов.

Тепловые шумы вызываются хаотическим тепловым движением свободных электронов проводящего материала приемника. В результате такого движения, число электронов, перемещающихся в одном направлении, не равно числу электронов, движущихся в противоположном направлении. В результате, возникающий в нагрузке ток или напряжение носит случайный характер. Заметим, что тепловой шум присущ только проводникам и его среднеквадратичное отклонение определяется формулой Найквиста

$$S_U = \sqrt{u_{ш}^2} = \sqrt{4kTR_T \Delta f} \quad \text{или} \quad S_I = \sqrt{I_{ш}^2} = \sqrt{\frac{4kTR_T \Delta f}{R_T}}, \quad (2.13)$$

где k - постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж·градус $^{-1}$; T - температура чувствительного слоя приемника в К; Δf - полоса частот, в которой измеряется среднеквадратичное отклонение.

Генерационно-рекомбинационный шум. Он обусловлен флуктуациями скоростей тепловой генерации и рекомбинации свободных носителей заряда в полупроводнике, т.е. флуктуациями средней концентрации носителей тока. При этом сопротивление образца флуктуирует во времени, что вызывает флуктуации напряжения на нагрузке фотоприемника. В зависимости от свойств полупроводника возможны различные аналитические выражения для генерационно-рекомбинационного шума.

Для полупроводников с примесной проводимостью источником электронов или дырок является единственный примесный уровень. Поэтому флуктуации числа свободных носителей связаны с флуктуациями скорости их генерации и рекомбинации на этом уровне. Для криогенно охлаждаемых фотоприемников число термически ионизированных примесных центров очень мало и дисперсия напряжения холостого хода для генерационно-рекомбинационного шума образца с сопротивлением R определяется выражением

$$\overline{u_{ш-гп}^2} = \overline{i_{ш-гп}^2} R = (2IR)^2 \frac{t\Delta f}{N_0(1+w^2t^2)}, \quad (2.14)$$

где t - время жизни свободных носителей, N_0 - полное число свободных носителей, I - ток смещения.

Для полупроводников с проводимостью, близкой к собственной, примесные центры при рабочих температурах можно считать полностью ионизированными, поскольку уровни примесей расположены вблизи соответствующих зон. За счет тепловой энергии кристаллической решетки образуются электронно-дырочные пары. Как правило, из-за наличия примесей p - и n -типа концентрации электронов и дырок не равны между собой. В этом случае генерационно-рекомбинационный шум описывается выражением

$$\overline{u_{ш-гп}^2} = \overline{i_{ш-гп}^2} R = (2IR)^2 \left(\frac{b+1}{bN+P} \right)^2 \frac{NP}{N+P} \frac{t\Delta f}{(1+w^2t^2)}, \quad (2.15)$$

где b - отношение подвижностей электронов и дырок, N - полное число электронов, P - полное число дырок в образце. Если электронов существенно больше, чем дырок, а их подвижность превышает подвижность дырок (что обычно и наблюдается), то последнее выражение несколько упрощается

$$\overline{u_{ш-гп}^2} = \left(\frac{2IR}{N} \right)^2 \frac{Pt\Delta f}{(1+w^2t^2)}. \quad (2.17)$$

Дробовой шум. Следующим видом шума, который в основном наблюдается в диодах, является дробовой шум. Ток, протекающий через полупроводниковый диод можно описать выражением

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right],$$

где I_0 - ток насыщения при обратном смещении, V - приложенное напряжение, e - заряд электрона. Поскольку электрический ток является потоком дискретных частиц и зависит от их числа, которое флуктуирует во времени. Протекая по нагрузочному сопротивлению этот флуктуирующий ток, создает напряжение, дисперсия которого равна

$$\overline{u_{u-оп}^2} = 2e(I + 2I_0)R_n^2 \Delta f.$$

При нулевом смещении наклон вольт-амперной характеристики диода

$$R = \frac{kT}{eI_0},$$

ток I при этом равен нулю и выражение для дробового шума принимает вид

$$\overline{u_{u-оп}^2} = 4eI_0 R_n^2 \Delta f = 4 \frac{kT}{R} R_n^2 \Delta f.$$

При $R_n=R$ последнее выражение полностью совпадает с выражением для теплового шума. При достаточно большом обратном смещении $I = -I_0$, и выражение для дробового шума приобретает вид

$$\overline{u_{u-оп}^2} = 2eI_0 R_n^2 \Delta f \quad \text{или} \quad \overline{I_{u-оп}^2} = 2eI_0 \Delta f. \quad (2.18)$$

Последние выражения используются наиболее часто для описания дробового шума.

Шум типа 1/f. Этот шум проявляется в детекторах излучения на низких частотах. Обычно появление этих шумов связывают с наличием потенциальных барьеров на контактах, в объеме или на поверхности полупроводника. Для монокристаллических полупроводников с омическими контактами эти шумы в основном связаны с процессами на поверхности. В фотоэмиссионных приборах эти шумы наблюдаются в виде шумов мерцания, связанных с термоионной эмиссией, с эмиссией в сильном электрическом поле или утечками от анода к катоду. На практике часто применяют следующее выражение для описания низкочастотного шума

$$\overline{u_{ш-нч}^2} = K_{нч} I^2 R^2 \frac{\Delta f}{f}, \quad (2.19)$$

где $K_{нч}$ - численная постоянная, значение которой определяется для каждого типа приемника, например, для фоторезистора типа PbS $K_{нч} = 10^{-11} - 10^{-12}$.

Радиационный шум. Этот вид шума является внешним по отношению к приемнику и определяется флуктуациями сигнала, т.е. флуктуациями числа фотонов, попадающих на чувствительный слой как от внешних излучателей (цель, передатчик, фон), так и от охлаждаемых элементов конструкции оптико-электронной системы. Кроме того, в тепловых приемниках появляются флуктуации температуры из-за непостоянства процесса теплообмена между чувствительной площадкой и окружающей средой. Последние часто называют **тепловыми флуктуациями**.

Флуктуации мощности излучения, поступающего от фона - черного тела с температурой T_ϕ , на приемник с площадью s_{np} описываются выражением

$$\overline{\Delta \Phi_\phi^2} = 8e_n k T_\phi^5 s_{np} \Delta f,$$

где e_n - коэффициент поглощения чувствительного слоя приемника.

Поскольку приемник является, в свою очередь, излучателем с температурой T_{nu} , то флуктуации "уходящего" от него потока можно записать аналогично

$$\overline{\Delta \Phi_{nu}^2} = 8e_n k T_{nu}^5 s_{np} \Delta f.$$

Суммарные флуктуации, определяющие дисперсию радиационного шума, равны

$$\overline{\Delta \Phi_p^2} = 8e_n k (T_\phi^5 + T_{nu}^5) s_{np} \Delta f. \quad (2.20)$$

Спектр этого шума является равномерным (белым).

Радиационный шум определяется параметрами источника излучения, фона и условий работы приемника излучения. Практически он определяет предельное минимальное значение шумов криогенно охлаждаемых приемников. Поэтому часто за идеальный при-

емник принимают тот, у которого все шумы незначительны по сравнению с радиационным.

В различных типах фотоприемников может преобладать тот или иной тип шума. Например, у термоэлементов преобладают тепловые шумы, у полупроводниковых болометров - тепловые и токовые, у фоторезисторов - токовые и радиационные. При наличии нескольких шумовых механизмов их общее среднеквадратичное значение может быть вычислено суммированием их дисперсий. При использовании фотоприемников важно знать спектральную плотность мощности суммарных шумов, пример которой приведен на рис.

2.3. Выделяют три области спектра шумов. На низких частотах до f_1 (примерно 1 кГц)

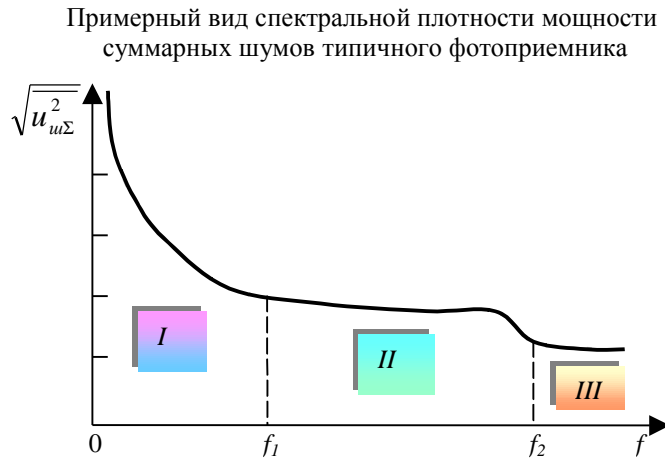


Рис. 2.3.

преобладающими являются шумы, подчиняющиеся зависимости $1/f$ (область I). В области средних частот II преобладают генерационно-рекомбинационные шумы. На больших частотах (более десятков кГц) наибольший вклад вносят тепловые шумы.

Зная спектральную плотность мощности шумов, можно выбрать такую частоту модуляции потока излучения и полосу рабочих частот системы регистрации сигнала, при которых значение собственных шумов приемника излучения будет мини-

мальным.

Пороговая чувствительность. Минимальный поток, который вызывает на выходе приемника сигнал, равный среднеквадратичному значению шумов приемника, называется порогом чувствительности:

$$\Phi_n = \frac{S_U}{S_U} = \frac{\sqrt{u_{ш}^2}}{S_U} \quad [\text{Вт}] \quad \text{или} \quad \Phi_n = \frac{S_I}{S_I} = \frac{\sqrt{I_{ш}^2}}{S_I} \quad [\text{Вт}]. \quad (2.21)$$

Порог чувствительности и чувствительность приемника взаимосвязаны. При этом первичным параметром, записываемым в паспорт приемника является чувствительность (S_U или S_I), определяемая экспериментально.

Удельная пороговая чувствительность. Поскольку шум зависит от полосы частот и площади фотоприемника, то для сравнения параметров различных фотоприемников вводится понятие удельной пороговой чувствительности

$$\Phi_{n-yd} = \frac{\Phi_n}{s_{np} \sqrt{\Delta f}} \quad [\text{Вт}/(\text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2})], \quad (2.22)$$

которая обычно определяется для площади приемника 1 см^2 и полосы частот 1 Гц . Часто эти два понятия не различают и под пороговой чувствительностью понимают удельную пороговую чувствительность.

Удельная обнаружительная способность. Поскольку пороговые потоки очень малы, оказалось удобным для сравнения разных приемников между собой пользоваться величиной, обратной удельной пороговой чувствительности. Ее называют удельной обнаружительной (детектирующей detectiviti) способностью

$$D^* = \frac{1}{\Phi_{n-yd}} = \frac{s_{np} \sqrt{\Delta f}}{\Phi_n} = \frac{S_U}{\sqrt{u_{ш}^2}} s_{np} \sqrt{\Delta f} \quad [\text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}] \quad (2.23)$$

и применяют для оценки способности приемника с площадью 1 см^2 к обнаружению единичного потока 1 Вт в полосе частот 1 Гц .

Постоянная времени. Инерционность фотоприемников характеризуется *постоянными фронта нарастания* t_n и *спада* t_{cn} фотоответа при импульсной засветке. Ими определяются предельные рабочие частоты модуляции излучения, при которых еще не происходит заметного уменьшения фотоответа. Как правило, $t_n < t_{cn}$. Промежуток времени от начала облучения до момента, когда выходная величина достигает 63% установившегося значения при длительном облучении, называется постоянной фронта нарастания t_n . Постоянная времени спада t_{cn} определяется как интервал времени после прекращения воздействия излучения, по истечении которого спадающий по экспоненте фотосигнал уменьшается в e раз (спадает до 37%). Если используется синусоидальная модуляция светового потока, то быстродействие приемника характеризуется *границной частотой* f_{gp} , на которой амплитуда его сигнала уменьшается до уровня 0,707 (на 3 дБ) относительно стационарного значения, а мощность падает в два раза, т.е. уменьшается на 3 дБ по мощности. Для "идеального" инерционного приемника зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты модуляции имеет вид

$$u_{\text{вых}}(\omega) = \frac{u_{\text{вых}}(0)}{\sqrt{1 + (\omega t)^2}}, \quad (2.24)$$

где $u_{\text{вых}}(0)$ - амплитуда сигнала фотоприемника на "нулевой" частоте, t - постоянная фронта нарастания. Из последнего выражение хорошо видно, что для этого случая постоянная времени определяется из условия $2\pi f_{gp} t = 1$.

Внутреннее сопротивление приемника. Этот параметр особенно важен при выборе или расчете цепи включения фотоприемника. Зная его можно выбрать оптимальное сопротивление нагрузки приемника излучения. Для различных приемников принято использовать разные параметры, с помощью которых можно оценить сопротивление чувствительного элемента. Например, для фоторезисторов в качестве параметра рассматривается *темновое сопротивление* R_T - сопротивление приемника в случае отсутствия его засветки. Для светодиодов обычно приводят значение *дифференциального сопротивления* R_d , которое равно отношению малого приращения напряжения сигнала к соответствующему приращению тока при заданных средней величине и изменениях облученности фотоприемника. Различают также *световое сопротивление*, измеряемое через определенный интервал времени после того, как на чувствительном слое установилась заданная освещенность.

Зависимость R_T фоторезистора PbS от температуры чувствительного слоя

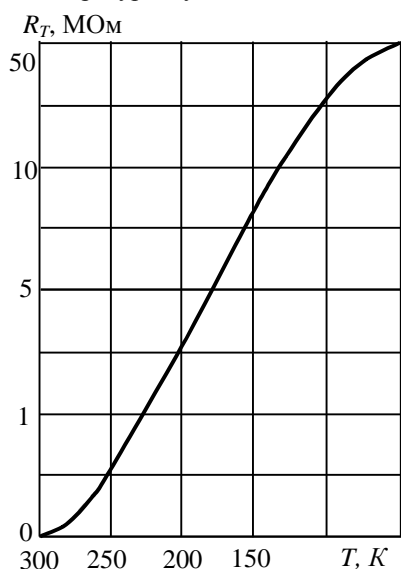


Рис. 2.4.

От величины внутреннего сопротивления приемника зависит постоянная времени фотоприемника и уровень его шумов. Темновое сопротивление большинства полупроводниковых приемников нестабильно по времени и сильно изменяется в зависимости от окружающих условий. Например на рис. 2.4. показана зависимость темнового сопротивления сернисто-свинцовых фоторезисторов от температуры чувствительного слоя. Видно, что при охлаждении слоя от комнатной температуры (293 К) до температуры твердого углекислого газа (195 К) внутреннее сопротивление изменяется почти в шесть раз, а при охлаждении до температуры жидкого азота (77 К) увеличивается в 100 раз. Необходимо иметь ввиду, что при этом меняется и крутизна преобразования приемника.

Для фоторезисторов некоторых типов используется *кратность изменения сопротивления* - отношение темнового сопротивления к сопротивлению при освещенности 200 лк и температуре

20±5°C.

2.2. Характеристики приемников.

Характеристика - это свойство приемника, которое может быть описано несколькими значениями каких-либо параметров и выражено в виде графика или таблицы. Рассмотрим основные характеристики приемников.

Спектральные характеристики. Изменения параметров приемника (чувствительности, обнаружительной способности и т.д.), наблюдаемые для разных длин волн принимаемого монохроматического излучения называются спектральными характеристиками. На рис. 2.5 показаны спектральные характеристики современных приемников ИК-излучения. Из представленных зависимостей видно, что красноволновая граница чувстви-



- а) - тепловых приемников: 1 - термоэлемента; 2 - металлического болометра с золотой чернью; 3 - полупроводникового болометра с окном из KRS-5; 4 - иммерсионного болометра с германиевой линзой;
- б) - фоторезисторов при охлаждении до 78 К: 5 - сурьмяно-свинцового; 6 - теллуровсвинцового; 7 - селенистосвинцового; 8 - сурьяно-индиевого; 9 - германиевого;
- в) - фотодиодов и фототранзисторов: 10 - германиевого; 11 - кремниевого

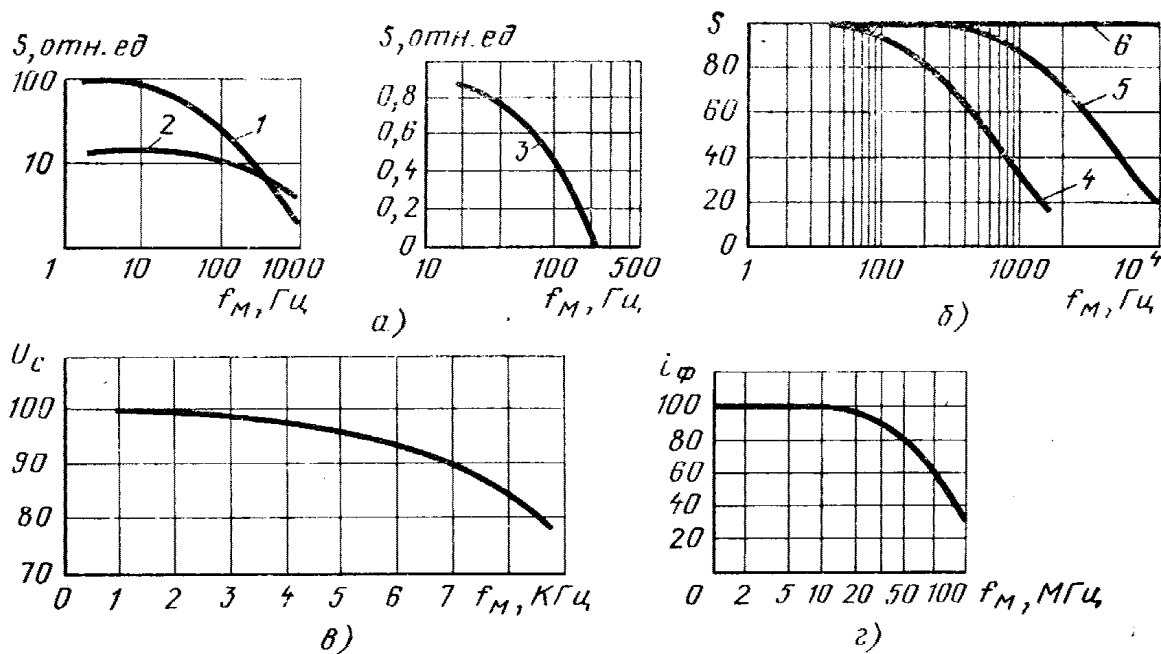
Рис. 2.5.

тельности фоторезисторов, охлаждаемых до 78 К, достигает 6 ... 7 мкм у селенистосвинцовых фоторезисторов и 10 ... 15 мкм - у германиевых приемников. Фотодиоды и фототранзисторы работают без охлаждения, и граница их чувствительности находится в пределах 1,0 ... 1,8 мкм. Наиболее длинноволновую границу чувствительности имеют тепловые приемники - термоэлементы и болометры.

Частотные характеристики. Они определяют зависимость крутизны преобразования приемника от частоты модуляции принимаемого излучения. Поскольку от частоты зависят и шумовые параметры приемников излучения, то к частотным характеристикам относят и спектральную плотность мощности шума приемника, а также частотную зависимость удельной обнаружительной способности $D^*(f)$. На рис. 2.6. представлены типичные частотные характеристики некоторых приемников излучения. Из представленных зависимостей видно, что наиболее инерционными являются тепловые приемники излучения. Фоторезисторы имеют на порядок лучшие частотные характеристики. Современные фотодиоды имеют достаточно большое быстродействие, например p - i - n диоды для опто-

волоконных систем связи могут работать на частотах более 1 ГГц. Наиболее чувствительные приемники - фотоэлектронные умножители обеспечивают прием вплоть до частот модуляции 100 ... 200 МГц.

Частотные характеристики приемников



- а) тепловых приемников: 1 - металлического болометра с давлением гелия в баллоне 13,3 Па; 2 - то же с давлением 10130 Па; 3 - полупроводникового болометра;
 б) сернисто-свинцового и сурьмяно-индиевого фоторезисторов: 4 - охлаждаемых до 195 К; 5 - неохлаждаемых; 6 - сурьмяно-индиевых охлаждаемых до 78 К;
 в) германиевого фотодиода;
 г) фотоэлектронного умножителя

Рис. 2.6.

Энергетическая (световая) и вольтовая характеристики. Энергетическая (световая) характеристика выражает зависимость сигнала на выходе приемника от величины падающего потока. Селективные приемники излучения при увеличении потока, падающего на их, ведут себя подобно глазу - их чувствительность уменьшается. Обычно при большой освещенности крутизна преобразования приемника падает, что проявляется в виде нелинейной ее зависимости от принимаемого потока. Поэтому чувствительность приемника должна определяться при заданной освещенности приемной площадки и заданном спектральном составе.

Вольтовые характеристики селено-свинцового фоторезистора

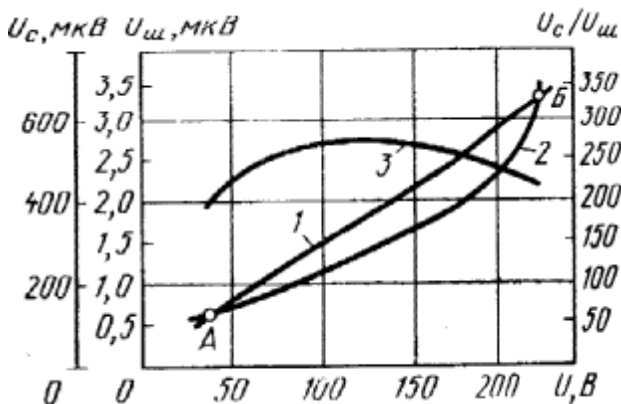


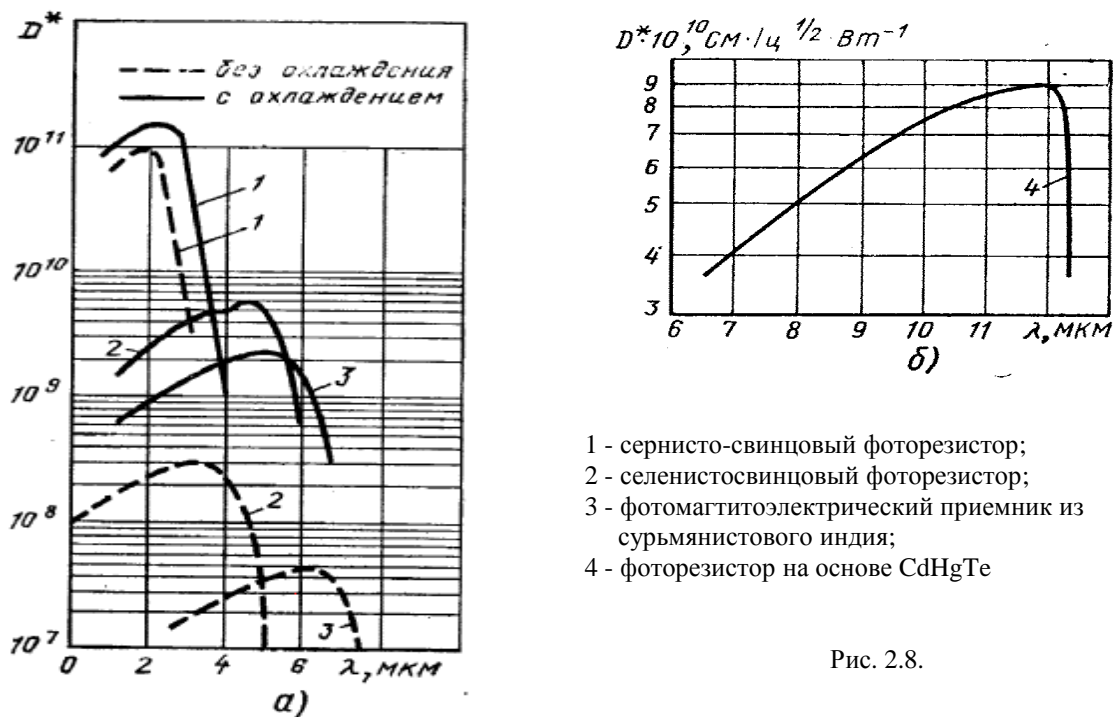
Рис. 2.7.

Вольтовые характеристики описывают зависимость выходного сигнала приемника, его шумов и пороговой чувствительности от величины питающего напряжения. На рис. 2.7. приведены зависимости изменения среднеквадратичного значения шумов (кривая 1), амплитуды сигнала (2) и отношения сигнал/шум (3) от питающего напряжения для фоторезистора PbSe. Хорошо видно, что существует оптимальная величина питающего напряжения, при которой отношение сигнал/шум имеет максимальное значение. Уменьшение или увеличение

напряжения на чувствительном слое относительно оптимального снижает отношение сигнал/шум. Подобные характеристики снимают и для других типов приемников, что позволяет выбирать оптимальные значения питающих напряжений.

Температурная характеристика показывает изменения параметров приемника в зависимости от температуры чувствительного слоя. Обычно внутреннее сопротивление фоторезисторов растет при снижении температуры (см. рис. 2.4). Охлаждение приводит также к улучшению пороговой чувствительности приемника излучения, что связано с уменьшением тепловых и избыточных шумов. Влияние температуры на параметры приемников излучения представлено на рис. 2.8 - 2.10. При охлаждении приемников от ком-

Изменение удельной обнаружительной способности D^* при охлаждении некоторых типов приемников излучения до температуры 78 К



- 1 - сернисто-свинцовый фоторезистор;
- 2 - селенистосвинцовый фоторезистор;
- 3 - фотомагнитоэлектрический приемник из сурьмянистого индия;
- 4 - фоторезистор на основе CdHgTe

Рис. 2.8.

натной температуры до температуры жидкого азота обнаружительная способность фоторезистора PbSe повышается в десятки раз, а более длинноволнового InSb - почти в 100 раз.

Зависимость D^* от температуры слоя фоторезисторов Ge:Hg (1) и CdHgTe (2)

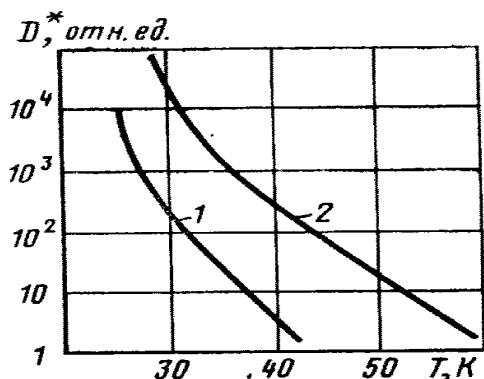


Рис. 2.9.

Зависимость темнового тока кремниевого фотодиода ФД-24К от температуры слоя

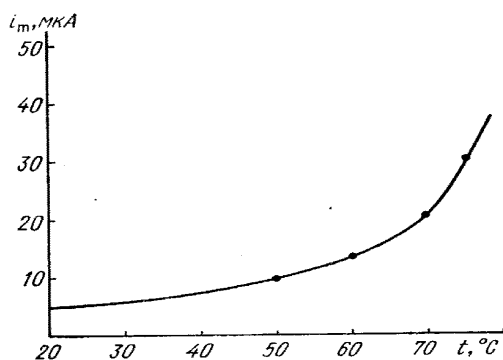


Рис. 2.10.

Еще больший эффект от охлаждения у приемников на тройных соединениях CdHgTe (см. кривую 2 на рис. 4.9). При охлаждении на 30 градусов величина D^* увеличивается в 10^4 раз. Повышение температуры отрицательно сказывается на параметрах приемников. На-

пример, как показано на рис. 4.10 увеличение температуры кремниевого фотодиода с 20°C до 75°C приводит к пятикратному росту темнового тока.

Пространственные характеристики. К ним обычно относят *зонную характеристику* - распределение чувствительности по площадке приемника, *угловую характеристику чувствительности* - ее зависимость от угла падения лучей на фотоприемник, а для координатных приемников - *координатную характеристику*, определяющую зависимость сигнала на выходе приемника от координаты изображения (светового пятна) на чувствительном слое.

Обнаружительная способность современных приемников ИК-излучения. Пороговая чувствительность приемников излучения при отсутствии собственных шумов и шумов последующих каскадов усиления электрических сигналов ограничивается флуктуациями потоков сигнала и фонового излучения. При слабых сигналах приемник работает в режиме ограничения флуктуациями фонового излучения, источниками которых являются обычно окружающие предметы. Максимум теплового излучения тела с температурой 295 К лежит вблизи 10 мкм; четверть всей энергии теплового излучения приходится на область длин волн до 10 мкм, а три четверти - на область больше 10 мкм. Таким образом, для приемников ИК излучения предел чувствительности связан с флуктуациями фонового излучения, в то время как для приемников видимого и ультрафиолетового излучений этот предел, как правило, обусловлен флуктуациями излучения сигнала. На рис. 4.11 представлены спектральные зависимости D^* современных приемников излучения и показаны их предельно возможные значения в режиме ограничения фоном.

Спектральные зависимости удельной обнаружительной способности современных ИК приемников

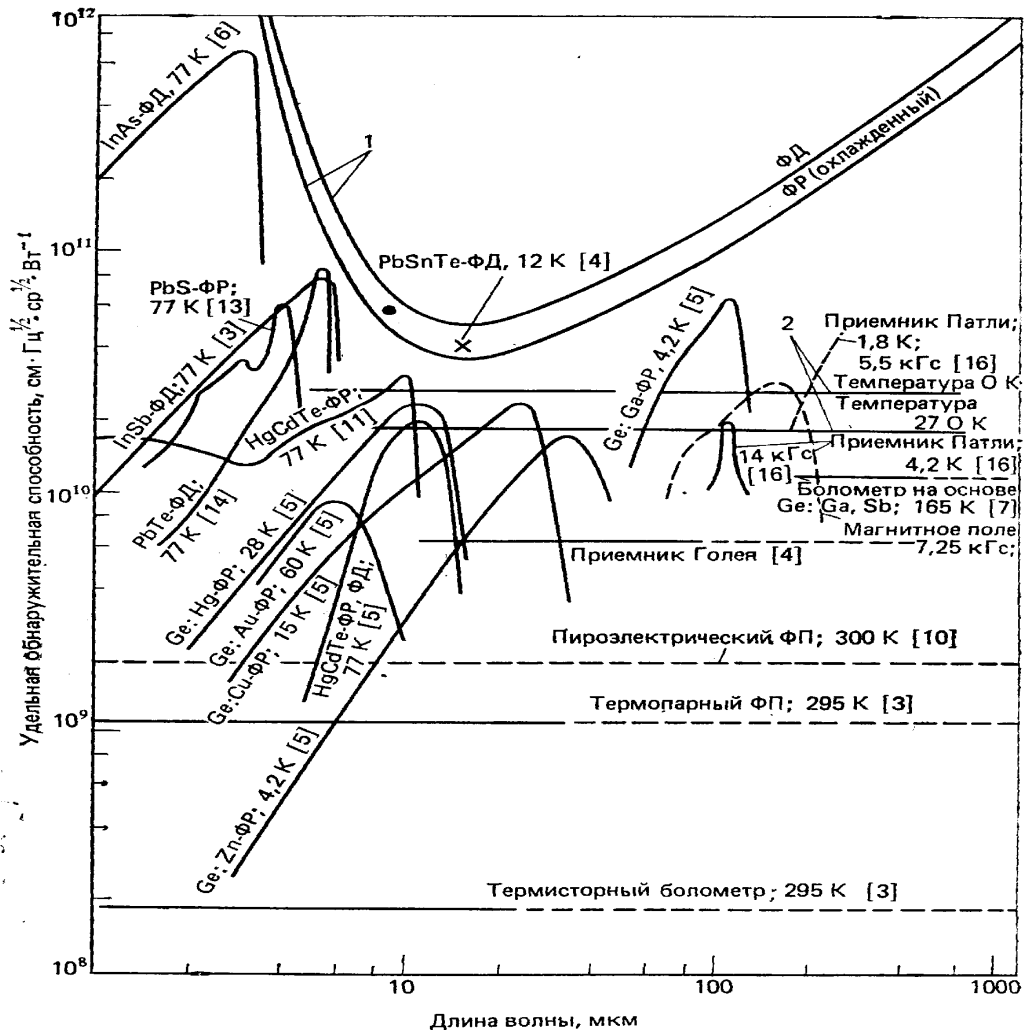


Рис. 2.11.