

## ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ И ОСВЕЩЕНИЯ.

Действие источника излучения на фото-транзистор зависит от спектральной чувствительности транзистора и распределения энергии в спектре источника. При рассмотрении этой энергии используются два (взаимосвязанных родственных) вида терминологии. Первая из них *энергетическая*, относящаяся к физическим системам; вторая — *фотометрическая*, относящаяся к физиологическим системам.

Фотометрическая система определяет энергию относительно визуального действия. Например, свет от стандартной лампы в 60 Вт является явно видимым и, как таковой, характеризуется некоторым фотометрическим параметром. Излучение резистора мощностью в 60 Вт невидимо и его фотометрический показатель равен нулю. Но и лампа накаливания, и резистор характеризуются некоторыми энергетическими параметрами.

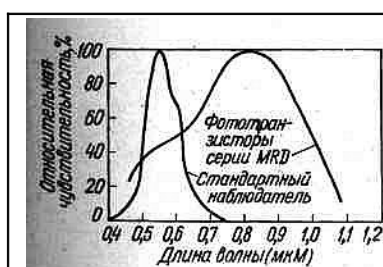


Рис. 4.6. Спектральная чувствительность стандартного наблюдателя и фототранзисторов серии MRD (Motorola)

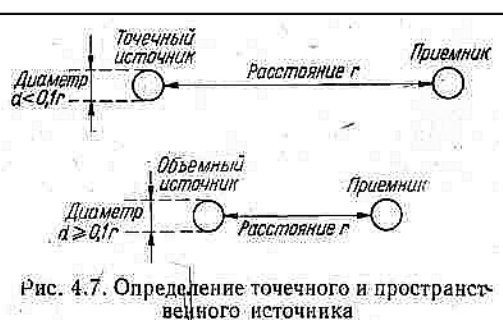


Рис. 4.7. Определение точечного и пространственного источника

Определяющим фактором для фотометрических систем является *кривая спектральной чувствительности стандартного наблюдателя*. На рис. 4.6 такая кривая сравнивается со спектральной чувствительностью фототранзисторов серии MRD. Определение спектральной чувствительности энергетической системы можно представить себе как отклик на единицу освещенности для всех длин волн. Сравнение энергетической и фотометрической терминологии приведено в таблице к рис. 4.7.

Между энергетическими и фотометрическими величинами существует взаимосвязь. Так, на длине волны 0,55 мкм (длина волны максимальной чувствительности)

### Энергетическая и фотометрическая терминология ( к рис. 4.7. )

Описание	Энергетические единицы	Фотометрические единицы
Поток лучистой энергии	Лучистый поток, $P$ ватт	Световой поток, $F$ люмен
Поток, испускаемый с поверхности источника	Энергетическая светимость, $W$ , ватт/метр <sup>2</sup>	Светимость, $L$ люмен/метр <sup>2</sup>
Сила источника излучения (объемный источник)	Энергетическая яркость, $B_R$ , ватт/(стерадиан × метр <sup>2</sup> )	Яркость, $B_L$ кандела/метр <sup>2</sup>
Сила источника излучения (точечный источник)	Энергетическая сила света, $I_R$ , ватт/стерадиан	Сила света, $I_L$ кандела
Плотность потока падающего на поверхность приемника	Энергетическая освещенность (облученность) $H$ , ватт/метр <sup>2</sup>	Освещенность, $E$ люкс

стандартного наблюдателя) излучаемый поток мощностью в 1 Вт равен световому по- I току 680 лм (люмен).

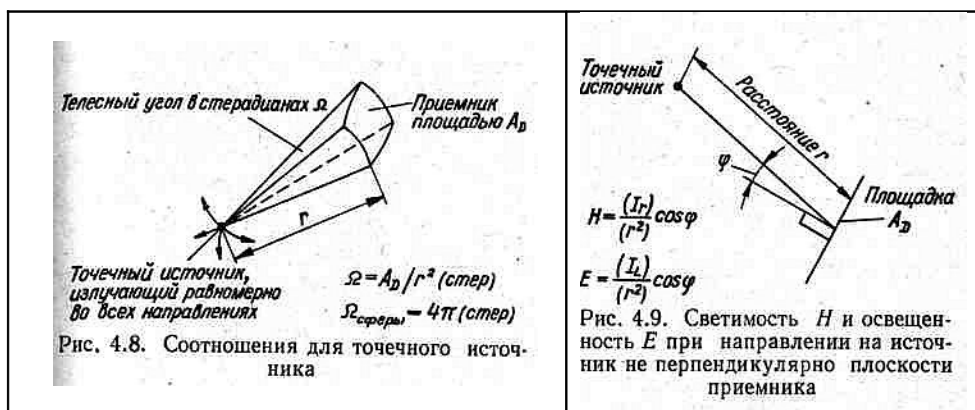
Фотометрическое действие источника излучения может быть измерено непосредственно фотометром. Однако, большинство фототранзисторов ориентированы на использование с энергетическими системами. Поэтому часто оказывается необходимым преобразовывать фотометрические параметры источника, такие как номинальная мощность лампы накапливания в канделах, в энергетические параметры.

#### 4.3.1. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

В проектировании электрооптических систем геометрические соотношения имеют первостепенное значение. Источник можно рассматривать как *точку* или *пространство* в зависимости от соотношения между размерами источника и расстоянием между источником и светоприемником (детектором).

Точечный источник. Точечным называют источники, диаметр которых составляет меньше десяти процентов от расстояния между источником и детектором. На рис. 4.8 показан точечный источник, излучение которого одинаково во всех направлениях. Там же приведены расчетные соотношения для точечного источника в терминах энергетических и фотометрических величин. Рис. 4.8 основан на предположении, что фотодетектор расположен так, что его поверхность касательна к сфере с точечным источником в центре. Плоскость детектора может быть расположена под углом к касательной плоскости. При этих условиях, как показано на рис. 4.9, светимость ( $H$ ) и освещенность ( $E$ ) изменяются с изменением угла  $\varphi$ .

Объемный источник. Если диаметр источника больше 10% расстояния до детектора, его считают объемным. Этот случай показан на рис. 4.10. На рис. 4.11 приведены расчетные соотношения для объемного источника.



Соотношения для точечного источника (рис. 4.8 и 4.9)

Описание	Энергетические единицы	Фотометрические единицы
Сила точечного источника света	$I_R$ , ватт/стерадиан	$I_L$ , люмен/стерадиан, кандела
Интенсивность падающего потока	Облученность $H = I_R / r^2$ ватт/расстояние <sup>2</sup>	Освещенность $E = I_L / r^2$ люмен/расстояние <sup>2</sup> , люкс
Полный поток от точечного источника	$P = 12,56 I_R$ ватт	$F = 12,56 I_L$ люмен



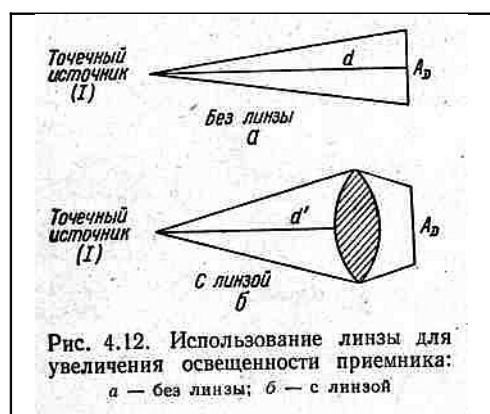
Расчетные соотношения для объемного источника (рис. 4.10 и 4.11)		
Описание	Энергетические единицы	Фотометрические единицы
Яркость источника	$B_R$ , ватт/(стерадиан x метр <sup>2</sup> )	$B_L$ , кандела/метр <sup>2</sup>
Плотность излучаемого потока	$W = 3,14 B_R$ ватт/метр <sup>2</sup>	$L = 3,14 B_L$ люмен/метр <sup>2</sup>
Плотность падающего потока	$H = B_R * A_s / (r^2 + d^2/4)$ , ватт/метр <sup>2</sup>	$E = B_L * A_s / (r^2 + d^2/4)$ , люмен/метр <sup>2</sup>

Заслуживает отдельного рассмотрения случай, когда диаметр источника много больше разделяющего расстояния (то есть, когда детектор находится в непосредственной близости от источника). При этих условиях излучаемый и падающий потоки равны и общая падающая энергия приблизительно совпадает с общей излученной энергией. В этом случае говорят, что между источником и детектором существует полная связь.

### 4.3.2. ОБЪЕКТИВЫ ДЛЯ ФОТОТРАНЗИСТОРОВ

Для увеличения освещенности детектора могут быть эффективно использованы объективы. Как видно из рис. 4.12, а, облучение поверхности объекта точечным источником с силой света  $I$  равно:

$$\text{облучение} = \text{интенсивность} / (\text{разделяющее расстояние})^2$$

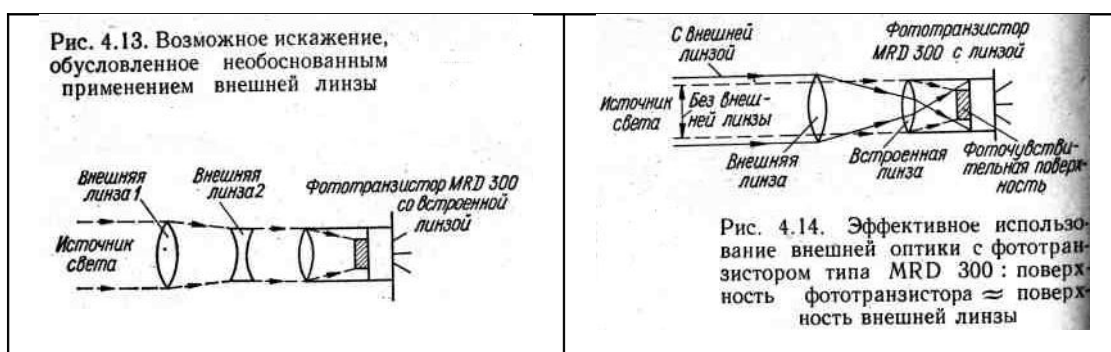


На рис. 4.12,б между источником света и детектором размещается линза. Если радиус линзы больше радиуса детектора,

то увеличение падающего на детектор светового потока приближенно выражается как:

$$\text{увеличение линзы} = 0,9 \times (\text{радиус линзы}/\text{радиус детектора})^2$$

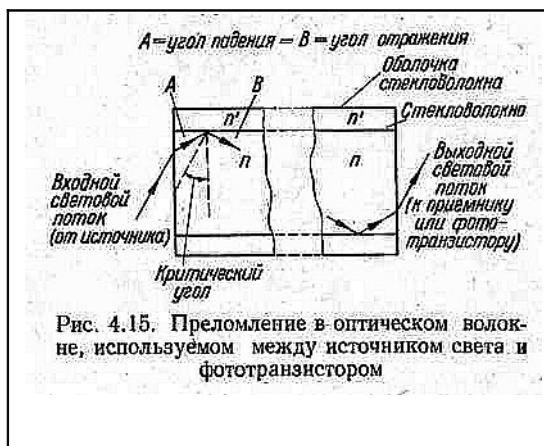
Следует подчеркнуть, что при произвольном расположении линзы могут принести больше вреда, чем пользы. Эффективность системы линз обеспечивается, тщательным расчетом. Например, фототранзистор MRD 300 снабжен линзой, которая эффективна при параллельном потоке падающих световых лучей (приблизительно, как при удельном равномерно излучающем во все стороны точечном источнике). Если перед этим фототранзистором поместить внешнюю линзу, как показано на рис. 4.13, падающий на линзу транзистора поток становится не параллельным. Тем самым светопередающая цепь окажется расстроенной. В результате, улавливаемая фототранзистором часть светового потока будет меньше, чем без внешней линзы.



На рис. 4.14 показана эффективная система линз. Линза 1 сводит падающий на ее поверхность поток к линзе 2, которая преобразует сходящийся пучок в параллельный. Входной световой поток фототранзистора равен (если пренебречь потерями в линзах 1, 2) потоку, падающему на линзу 1. Это эквивалентно увеличению поверхности фототранзистора до размеров линзы 1.

### 4.3.3. ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА В ФОТОТРАНЗИСТОРАХ

Эффективным способом улучшения связи между источником излучения и детектором является использование волоконной оптики. Работа оптического волокна основана на принципе *полного внутреннего отражения*, как показано на рис. 4.15. Стекловолокно с коэффициентом преломления  $n$  покрыто стекловолокном с меньшим коэффициентом преломления  $n'$ .



Падающий на входной торец стекловолокна световой луч преломляется на границе воздух—стекло. Если после преломления луч света достигает границы раздела двух материалов под углом  $A$ , меньшим, чем критический угол на рис. 4.15, то свет отражается внутрь волокна под углом  $B$ , равным углу  $A$ . Пройдя через стекловолокно, свет преломится на границе стекло—воздух выходного торца.

Для полного внутреннего отражения свет должен падать на входной торец под углом, обеспечивающим угол внутреннего отражения, равный (или меньше) половине угла, который дополняет критический до  $90^\circ$ .

Поскольку луч света проходит внутри стекла, неизбежно некоторое его ослабление. Для типичного стекловолокна коэффициент поглощения от 15% до 30% считается вполне приемлемым. Кроме того, необходимо учитывать потери на входном и выходном торцах световода, которые обычно достигают 30%. В результате, из светового потока, падающего на входной торец световода длиной, например, 1 метр, до детектора доходит около 50%.

#### 4.3.4. ВОЛЬФРАМОВЫЕ ЛАМПЫ ДЛЯ ФОТОТРАНЗИСТОРОВ

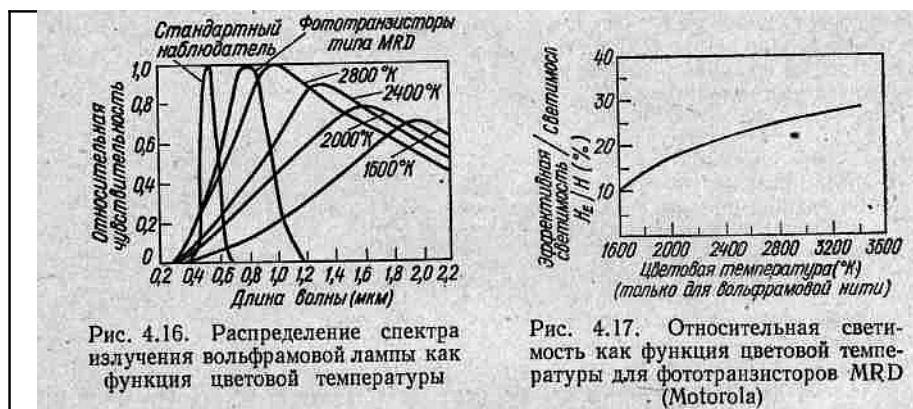
В качестве источника излучения для фототранзистора часто используют лампы накаливания с вольфрамовой нитью. Энергия излучения таких ламп распределена в широком диапазоне длин волн. Так как глаз человека и фототранзистор обладают различной спектральной чувствительностью, воздействие излучения вольфрамовой лампы на них также различно. При этом спектральный состав излучения вольфрамового излучателя существенно зависит от *цветовой температуры*.

Цветовая температура лампы — это температура идеально черного излучателя, необходимая для того, чтобы он создавал такой же оптический эффект, как и лампа. При низкой цветовой температуре видимое излучение вольфрамовой лампы весьма мало. По мере роста цветовой температуры излучение смещается в область видимого спектра.

На рис. 4.16 приведены спектральные характеристики вольфрамовых ламп для различных значений цветовой температуры. Лампы рассеивают одинаковую энергию, а их характеристики приведены по отношению к характеристике с цветовой температурой 2800 К. Для сопоставления там же показаны спектральные характеристики стандартного наблюдателя и фототранзисторов MRD фирмы Motorola.

**Эффективное излучение.** Хотя чаще всего известна чувствительность фотодетектора по отношению к источнику света, более общей является чувствительность его к источнику излучения. По этой причине целесообразнее проводить расчеты в терминах излучения. Однако из-за того, что спектральные характеристики источника и детектора в общем случае раз-

народны, необходимо эти характеристики объединить. Графическое объединение было проведено для фототранзисторов MRD для некоторых значений цветовой температуры лампы. Результат в относительных единицах приведен на рис. 4.17 в виде зависимости относительной светимости от цветовой температуры. Как видно из рисунка, эффективность вольфрамовой лампы при температуре 2600 К



составляет около 24% при использовании серии фототранзисторов типа MRD. Это значит, что из потока излучения такой лампы, измеренного детектором и равного 20 мВт/см<sup>2</sup>, фототранзистор эффективно воспринимает приблизительно

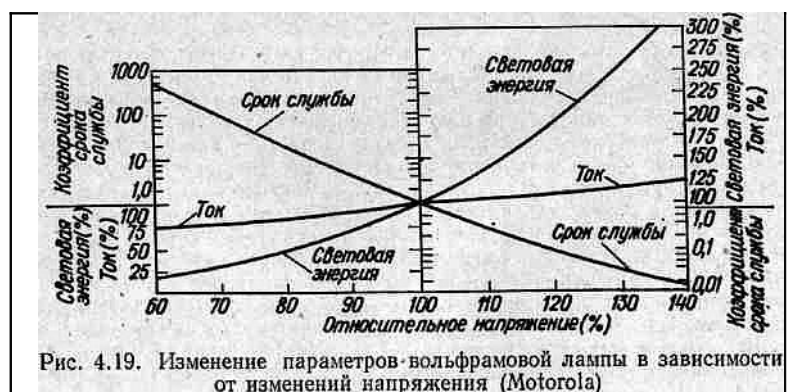
$$20 \times 0,236 = 4,72 \text{ мВт/см}^2$$

Спецификации для партий фототранзисторов MRD содержат корректирующие коэффициенты для эффективного излучения. Например, для MRD450 установлена типичная чувствительность 0,8 мА/(мВт/см<sup>2</sup>). Параметр получен для вольфрамового источника с температурой 2870 К, излучающего на транзистор около 5 мВт/см<sup>2</sup>. Это должно вызвать протекание тока около 4 мА (5 мА X 0,8). Но, как следует из рис. 4.17, эффективное излучение составляет 0,255 X 5 = 1,28 мВт/см<sup>2</sup>.



Используя значение эффективного излучения и значение протекающего тока для типичной чувствительности 4 мА, найдем, что чувствительность к монохроматическому излучению равна: 4 мА/(1,28 мВт/см<sup>2</sup>) = 3,13 мА/(мВт/см<sup>2</sup>).

Как уже отмечалось, излучение 20 мВт/см<sup>2</sup> дает эффективную освещенность 4,72 мВт/см<sup>2</sup> (т. е. излучение 20 мВт/см<sup>2</sup> аналогично монохроматическому излучению 4,72 мВт/см<sup>2</sup>). Следовательно, результирующий ток равен: 3,13 x 4,72 = 14,0 мА.



Другой метод основан на использовании характеристики относительной чувствительности как функции цветовой температуры (рис. 4.18). Как видно из рисунка, относительная чувствительность снижается до 83% при цветовой температуре 2600 К. Типичная чувствительность MRD450, определенная для освещенности 20 мВт/см<sup>2</sup> от лампы с вольфрамовой нитью при температуре 2870 К, равна 0,9 мА/(мВт/см<sup>2</sup>). При температуре источника 2600 К и освещенности 20 мВт/см<sup>2</sup> будет протекать ток  $20 \times 0,83 \times 0,9 = 14,9$  мА.



**Определение цветовой температуры.** Проектировщик электронных цепей не всегда имеет возможность измерить цветовую температуру. Но, если он сможет измерить напряжение, то сможет получить и разумное приближение цветовой температуры.

На рис. 4.19 показаны классические зависимости тока, силы света (световой энергии) и срока службы вольфрамовой лампы как функции приложенного к ней напряжения. На рис. 4.20 показана зависимость цветовой температуры от отношения силы света (в канделах) к электрической мощности (в ваттах) лампы в рабочей точке.

Пусть, например, в качестве источника света для фототранзистора используется индикаторная лампа типа 47. С целью увеличения срока службы на нее подают напряжение, равное 80% от номинального. Лампа типа 47 рассчитана на 6,3 В и 150 мА при силе света 0,52 кд.

Из графика на рис. 4.19 находим, что при напряжении, составляющем 80% от номинального, протекает ток, равный 86% номинального, то есть  $150 \text{ мА} \times 0,86 = 129 \text{ мА}$ , а сила света при этом равна 50% расчетной, т. е.  $0,52 \times 0,50 = 0,26 \text{ кд}$ .

При напряжении  $6,3 \times 0,80 = 5,04 \text{ В}$  и токе 129 мА на лампе рассеивается мощность  $5,04 \times 0,129 = 0,65 \text{ Вт}$ . Используя отношение  $0,26/0,65 = 0,4$ , по графику на рис. 4.20 находим, что цветовая температура приблизительно равна 2300 К.

**Геометрические соображения.** Силу света большинства ламп определяют как полную светоотдачу в окружающее пространство, отнесенную к единице телесного угла. Тем самым сила света усредняется по всем направлениям. Однако, излучение вольфрамовой лампы распределено неравномерно, поэтому сила света зависит от ориентации лампы. На рис. 4.21 показана диаграмма распределения светового потока типичной матовой вольфрамовой лампы. Если ось лампы расположена вертикально, то максимум излучения приходится на горизонтальные направления. Штриховая кривая на рисунке представляет диаграмму равномерного излучателя, площадь которой равна площади реальной диаграммы. Из кривых видно, что излучение в горизонтальном направлении в 1,33 раза больше средней силы света, тогда как излучение в вертикальном направлении, противоположном цоколю лампы, составляет только 0,48 средней силы света.



Реальное распределение силы света лампы зависит от формы нити накаливания, ее размеров и ориентации так же, как и от телесного угла, ограниченного цоколем лампы, и расстояния от цоколя до центра нити накаливания.

Если сила света лампы приводится для *горизонтального направления*, то с помощью приведенной диаграммы можно довольно точно рассчитать освещенность относительно фотоприемника.

Другой формой оценки является *энергетическая сила света*, приводимая для ламп с рефлекторами. В любой системе измерения излучения этот параметр может быть дан в люмен/стерадиан (лм/ср) или канделах (кд).

#### 4.3.5. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА ДЛЯ ФОТОТРАНЗИСТОРОВ

В отличие от широкого спектра, излучаемого вольфрамовыми лампами, энергия излучения полупроводниковых источников света сосредоточена в относительно узком диапазоне длин волн. Светодиоды, (СД) из арсенида галлия (GaAs) имеют спектральную характеристику излучения, которая хорошо сочетается с характеристикой кремниевых фототранзисторов. Как видно из рис. 4.22, светодиоды излучают свет различной длины волны в зависимости от типа материала полупроводника. Светодиоды из GaAs и фототранзисторы серии MRD тщательно согласованы. Отношение эффективного излучения к полному излучению составляет 0,9, т. е. фототранзистор воспринимает 90% излученного светодиодом из GaAs света. Например, если светодиод излучает световой поток с плотностью энергии 4 мВт/см<sup>2</sup>, то фототранзистор воспринимает 3,6 мВт/см<sup>2</sup>. Это значит, что типичный светодиод из GaAs в 3,5 раза эффективнее, чем



вольфрамовая лампа при температуре 2870 К. Таким образом, общая чувствительность MRD450, средняя чувствительность которого равна  $0,8 \text{ мА}/(\text{мВт}/\text{см}^2)$  в сочетании со светодиодом из GaAs, возрастает до величины  $0,8 \times 3,5 = 2,8 \text{ мА}/(\text{мВт}/\text{см}^2)$ .



Рис. 4.22. Спектральные характеристики для светодиодов на основе GaAs, GaAsP и SiC и фототранзисторов MRD (Motorola)

**Использование светодиодов с объективом.** Дополнительное обстоятельство использования светодиодов связано с полярной чувствительностью. Наличие линзы в корпусе светодиода, как и в случае с любым источником света, ограничивает телесный угол. В случае, когда линза со светодиодом используется, результирующая облученность определяется выражением:

$$H = \frac{4P}{3,14\Omega^2 d^2}, \text{ Вт}/\text{см}^2,$$

где:  $P$  — полная выходная энергия излучения светодиода в ваттах;  
 $\Omega$  — телесный угол в стерadianах;  
 $d$  — расстояние между светодиодом и детектором в сантиметрах.

#### 4.4. ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОТРАНЗИСТОРОВ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ И НИЗКИХ ЧАСТОТАХ

Схемная модель, приведенная на рис. 4.23, обычно вполне достаточна для расчетов на "низких частотах и установившихся режимах цепей, содержащих фототранзисторы. Заметим, что модель не содержит емкостей, что вполне допустимо при ее использовании для низких частот и на постоянном токе.

Заметим также, что диапазон частот, в котором применима показанная на рис. 4.23 модель, существенно зависит от сопротивления нагрузки.

На рис. 4.24 приведены графики зависимости верхней граничной частоты коэффициента передачи фототранзистора (частота спада на 3 дБ) как функции величины нагрузочного сопротивления.

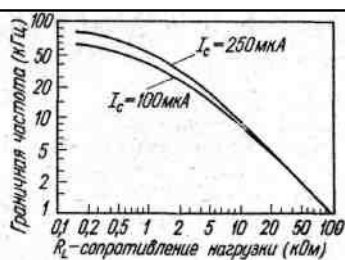
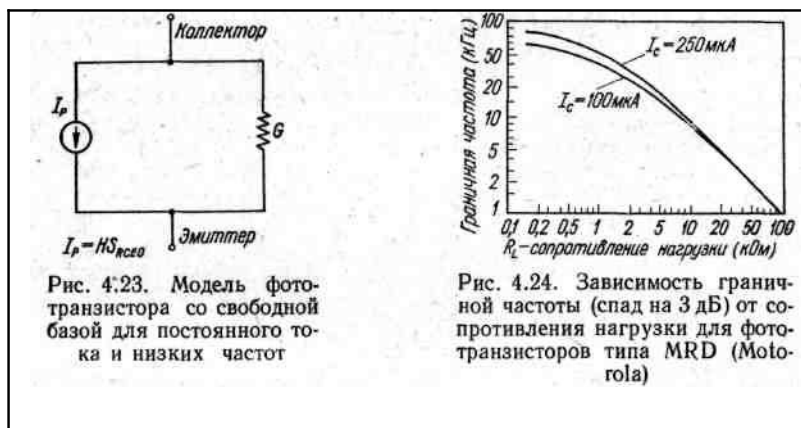


Рис. 4.24. Зависимость граничной частоты (спад на 3 дБ) от сопротивления нагрузки для фототранзисторов типа MRD (Motorola)

Пусть модулируемый источник света должен управлять фототранзистором с частотой 10 кГц. Для результирующего фототока 100 мкА при частоте 10 кГц из рис. 4.24 находим, что максимальное сопротивление нагрузки  $R_L < 8$  кОм. Это значит, что при расчете цепи с током через фототранзистор 100 мкА на частоте до 10 кГц низкочастотная модель пригодна, если сопротивление нагрузки меньше или равно 8 кОм. С ростом сопротивления нагрузки при неизменной величине фототока и верхней граничной частоты модель становится неточной. Вместо нее может быть использована модель, приведенная на рис. 4.3 или ей подобная. Вместо углубления в модели фототранзисторов будем применять расчетные соотношения и данные к реальным задачам на низких частотах или при установившемся режиме.