

Тема "Оптические датчики".

Источник Ж.Аш.

### 5.1. Свет и его основные свойства

Оптические датчики позволяют преобразовать в электрические сигналы информацию, доставляемую видимым светом или излучением соседних длин волн — инфракрасным и ультрафиолетовым.

Свет одновременно имеет и волновую, и корпускулярную природу. В волновом аспекте он представляет собой электромагнитные колебания, излучаемые при электронных переходах в атомах источника с одного энергетического уровня на другой. Эти волны распространяются в вакууме со скоростью  $c=299\,792\,458 \text{ м/с}^1$ , а в веществе — с меньшей скоростью  $v=c/n$ , где  $n$  — показатель преломления среды.

Частота  $\nu$  и длина волны  $\lambda$  связаны соотношением  $\lambda=v/\nu$ , т. е. в вакууме  $\lambda=c/\nu$  (рис. 5.1).

Световая монохроматическая волна создается взаимно ортогональными и синусоидально изменяющимися во времени и пространстве электрическим и магнитным полями, перпендикулярными направлению ее распространения. Различные атомы источника (исключая случай лазера) излучают волны, фазы и направления полей которых независимы и для каждого атома случайнм образом меняются во времени. Использование поляризатора позволяет получить линейно поляризованное излучение, для которого ориентация в пространстве электрического и магнитного полей постоянна.

В корпускулярном аспекте свет рассматривается, когда речь идет о взаимодействии его с веществом. Свет, как и все другие виды электромагнитного излучения, представляется состоящим из частиц — фотонов, каждый из которых несет элементарную энергию  $w_F$ , определяемую только частотой излучения  $\nu$ :  $w_F=h\nu$ , где  $h$  — постоянная Планка, равная  $6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

В веществе электроны связаны с атомами, и для того, чтобы стать свободными, они должны получить энергию  $w_l$ , равную

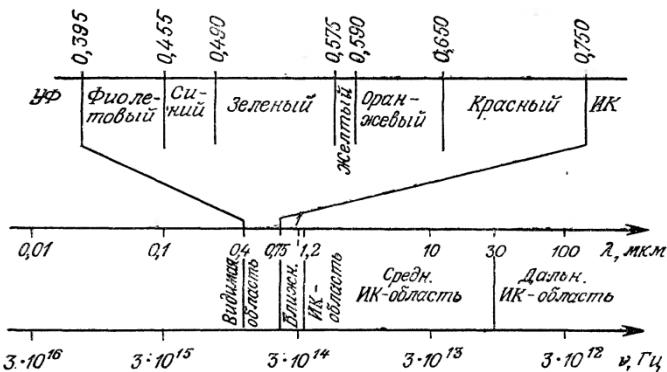


Рис. 5.1. Оптическое излучение: наименования областей и распределение их по спектру.

энергии их связи. Поглощение одного фотона вызывает освобождение одного электрона при условии  $w_F > w_l$ , т. е.:

$$\nu = w_l/h, \text{ или } \lambda \leq h\nu/w_l.$$

Максимальная длина волны, способная вызвать освобождение электрона в веществе, называется пороговой длиной волны  $\lambda_s$ :

$$\lambda_s = hc/w_l \text{ и } \lambda_{s \text{ мкм}} = 1,237/w_l \text{ эВ.}$$

## 5.2. Фотометрия

Величины, относящиеся к световому излучению, могут оцениваться двояко:

— отвлекаясь от всякого чувственного впечатления — исключительно по количеству энергии, ее распределению в пространстве и во времени в обычных физических единицах (дюймах, ваттах): это — энергетическая фотометрия, или радиометрия;

— оценка делается с учетом производимого зрительного впечатления, дополняющего чисто энергетическую оценку; тогда речь идет о световых измерениях (визуальной фотометрии), которые относятся только к видимой области спектра.

### 5.2.1. Энергетическая фотометрия — энергетические величины

В энергетической фотометрии используются следующие величины:

*Энергия излучения*  $Q$  — испускаемая, распространяющаяся или принимаемая энергия в форме излучения; измеряется в дюймах.

*Поток излучения*  $\Phi$  — испускаемая, распространяющаяся или принимаемая мощность в форме излучения ( $\Phi = dQ/dt$ ); измеряется в ваттах.

*Сила излучения*  $I$  — поток излучения, испускаемый в данном направлении в единичном телесном угле ( $I = d\Phi/d\Omega$ ); измеряется в Вт/ср.

*Энергетическая яркость*  $L$  — сила излучения, испускаемая с элемента поверхности  $dA$  в данном направлении, отнесенная к площади ортогональной проекции  $dA_n$  этого элемента на плоскость, перпендикулярную указанному направлению ( $L = dI/dA_n$ );  $L$  выражается в Вт/ср·м<sup>2</sup>.

*Энергетическая облученность*  $E$  — поток излучения, падающий на элемент поверхности, отнесенный к площади этого элемента ( $E = d\Phi/dA$ );  $E$  измеряется в Вт/м<sup>2</sup>.

### 5.2.2. Визуальная фотометрия

Речь идет о количественном выражении световых величин с учетом зрительного впечатления, производимого на среднего наблюдателя. Кривая относительной спектральной световой эффективности (прежнее название — кривая дневной видности — при дневном освещении — в противоположность ночной видности в сумерки) дает относительную чувствительность глаза  $V(\lambda)$  к различным монохроматическим излучениям по спектру (рис. 5.3).

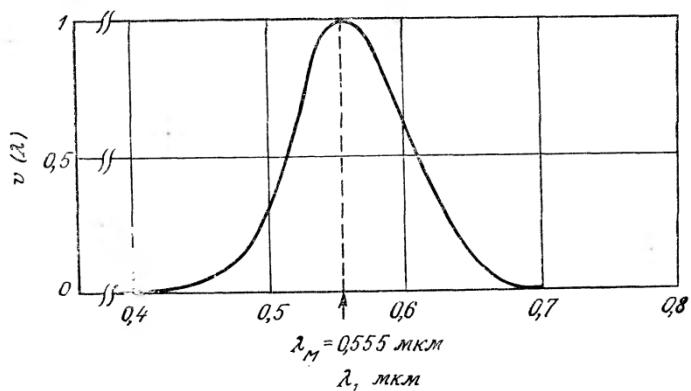


Рис. 5.3. Дневная кривая видности.

Для длины волны  $\lambda_M = 555$  нм эта чувствительность максимальна:  $V(\lambda_M) = 1$ .

Различные величины в визуальной фотометрии (обозначаемые индексом  $v$ ) оцениваются умножением соответствующей энергетической величины на коэффициент  $K \cdot V(\lambda)$ , пропорциональный относительной чувствительности (видности)  $V(\lambda)$  для длины волны  $\lambda$  рассматриваемого излучения.

По соглашению энергетический поток излучения 1 Вт с длиной волны  $\lambda_M$  соответствует световому потоку  $\Phi_v = 683$  Лм, т. е.  $K = 683^1$ .

Для монохроматического излучения с длиной волны  $\lambda$

$$\Phi_v(\lambda) = 683V(\lambda) \cdot \Phi(\lambda) \text{ лм.}$$

Для непрерывного по спектру излучения полный поток получается суммированием дифференциальных потоков, соответствующих различным длинам волн спектра:

$$\Phi_v = 683 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V(\lambda) \frac{d\Phi(\lambda)}{d\lambda} d\lambda.$$

Величина  $\frac{d\Phi(\lambda)}{d\lambda} d\lambda$  представляет собой дифференциальный поток  $d\Phi$ , заключенный между  $\lambda$  и  $\lambda + d\lambda$ . Пределы видимого спектра  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  обычно считают равными 380 и 760 нм соответственно.

Аналогичным образом любая величина  $X_v$  в визуальной фотометрии получается из соответствующей энергетической величины с помощью соотношений

$$X_v(\lambda) = 683V(\lambda) X(\lambda)$$

для монохроматического излучения и

$$X_v = 683 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V(\lambda) \frac{dX(\lambda)}{d\lambda} d\lambda$$

для непрерывного по спектру излучения. Здесь  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — указанные выше границы видимой области спектра, а  $\frac{dX(\lambda)}{d\lambda} d\lambda$  обозначает дифференциальную часть величины  $X$ , заключенную между  $\lambda$  и  $\lambda + d\lambda$ .

Важно отметить, что  $X_v$  зависит от распределения излучения по спектру  $dX(\lambda)/d\lambda$ .

Так, например, когда источником является лампа накаливания с вольфрамовой нитью, цветовая температура которой равна 2850 К, освещенности 1 лк соответствует энергетическая облученность  $4,75 \cdot 10^{-2}$  Вт/м<sup>2</sup>, т. е. 4,75 мкВт/см<sup>2</sup>. Ниже приведены основные фотометрические величины и их порядок для различных источников света.

#### Основные фотометрические единицы

Параметр	Световые единицы	Энергетические единицы
Поток	Люмен (лм)	Ватт (Вт)
Сила света и сила излучения	Кандела (кд)	Ватт/стериadian (Вт/ср)
Яркость	Кандела/м <sup>2</sup> (кд/м <sup>2</sup> )	Ватт/ср·м <sup>2</sup> (Вт/ср·м <sup>2</sup> )
Освещенность и облученность	Люмен/м <sup>2</sup> или люкс (лк)	Ватт/м <sup>2</sup> (Вт/м <sup>2</sup> )
Энергия	Люмен·с (лм·с)	Джоуль (Дж)

Порядок величин	
Яркость источников, кд/м <sup>2</sup>	Освещенность, лк
Фотографическая вспышка	$7 \cdot 10^{10}$
Полуденное солнце	$2 \cdot 10^9$
Вольфрамовая лампа накаливания	$6 \cdot 10^6$
Минимальная видимая яркость	$10^{-5}$
Дневной свет	$10^4$
Сумерки	10
Полная луна	$10^{-1}$
Звездное небо	$10^{-3}$

### 5.3. Свет как носитель информации

Для оптического излучения так же, как для электрического тока, можно указать две основные области применения:

а) энергетические применения, такие, как освещение или инфракрасный нагрев, когда источник излучения является преобразователем энергии и предназначен для преобразования подводимой к нему полезной мощности в соответствующую необходимую для намеченного применения форму;

б) информационные применения, когда свет служит носителем информации, которую он должен передавать (переносить).

Во втором случае измеряемая величина изменяет один из физических параметров излучения, воздействуя на него непо-

**Таблица 5.1.** Возможные изменения оптического излучения под воздействием измеряемой величины

Параметр излучения	Характер изменения	Первичная измеряемая величина
Направление распространения	Отклонение	Угловые координаты, деформация
	Ослабление за счет поглощения	Толщина, химический состав, плотность частиц в супензии (нефелометрия)
Поток	Модуляция прерыванием	Скорость вращения диска, число объектов (счет)
Частота	Изменение частоты (эффект Доплера)	Скорость перемещения
Интенсивность, длина волны	Спектральное распределение энергии	Температура источника излучения
Фаза	Разность фаз двух лучей из-за разности хода	Положение (координаты), размеры, перемещение
Поляризация	Вращение плоскости поляризации из-за двойного лучепреломления	Давление, механическое напряжение

средственно или косвенно; этот процесс может рассматриваться как первичное преобразование измеряемой величины. Физический параметр излучения, на который оказано воздействие, является вторичной измеряемой величиной; к ней и чувствителен оптический датчик.

В табл. 5.1 дан ряд примеров, показывающих, как может изменяться один из параметров излучения под воздействием первичной измеряемой величины.

#### 5.4. Источники света

Для эффективного использования оптического датчика требуется, чтобы он соответствовал характеристикам принимаемого излучения — спектру, потоку, частоте модуляции.

Свойства излучения определяются в первую очередь источником излучения, поэтому здесь вкратце будут рассмотрены важнейшие с точки зрения их применения характеристики основных типов источников излучения.

**Лампы накаливания с вольфрамовой нитью.** Вольфрамовая нить лампы накаливания помещается в стеклянном или кварцевом баллоне, наполненном инертным газом (в галогенных лампах — парами иода), чтобы ограничить испарение нити. Нить нагревается током; сила тока определяет температуру нити. Цветовой температурой нити называется такая температура че-

ного тела, при которой спектральное распределение излучения в видимой области подобно спектральному распределению излучения нити; цветовая температура несколько выше истинной.

Достоинствами ламп накаливания с вольфрамовой нитью являются значительный по величине поток и непрерывный спектр излучения, который может быть ослаблен с помощью фильтров.

К недостаткам ламп накаливания относятся значительная тепловая инерция, которая делает невозможной быструю модуляцию излучения с помощью питающего тока, ограниченный срок службы, а также хрупкость под воздействием ударов и вибраций.

**Электролюминесцентные диоды (светодиоды).** В диоде этого типа энергия, освобождаемая при рекомбинации электрона и дырки в  $p-n$ -переходе, вместо того, чтобы проявлять себя, как обычно, в форме фонона (энергии теплового возбуждения) освобождается в форме фотона.

Достоинствами светодиодов являются малая постоянная времени ( $\text{нс}$ ) и связанная с этим возможность модулировать излучаемый поток до очень высоких частот, управляя модуляцией посредством тока, а также четко определенный и ограниченный спектр излучения, высокая надежность и прочность.

К недостаткам светодиодов относятся сравнительно слабый по величине поток ( $\approx 10^2 \text{ мкВт}$ ) и зависимость потока от температуры.

**Лазеры.** Лазерный эффект — это эффект усиления света, автоматически поддерживаемый на достаточно высоком уровне положительной обратной связью. Лазер является источником с очень высокими монохроматичностью и яркостью, обладает очень узкой направленностью и высокой когерентностью. Это последнее свойство является отличительной особенностью именно лазера — тогда как излучение других источников является результатом взаимного наложения большого числа волн со случным распределением ориентации плоскости поляризации и фаз, в лазере все излучаемые волны имеют одинаковые поляризацию и фазу и их сложение дает единую волну с определенными характеристиками.

Временная когерентность волны характеризуется средней продолжительностью  $\tau_c$ , в течение которой вариации фазы волны в определенной точке регулярны, т. е. не подвержены каким-либо случным нарушениям непрерывности.

## 5.5. Метрологические характеристики оптических датчиков

Выходной величиной оптического датчика обычно является электрический ток; поэтому ток и его вариации в функции различных параметров чаще всего служат для характеристики свойств датчиков.

### 5.5.1. Темновой ток

Это ток, постоянно имеющийся на выходе фоточувствительного устройства, помещенного в темноту и находящегося при определенных условиях питания.

Темновой ток возникает по двум основным причинам. «Внутренняя» причина его возникновения связана с освобождением носителей заряда за счет теплового возбуждения; при фиксированной температуре этот процесс тем интенсивнее, чем больше пороговая длина волны материала, т. е. чем меньше его потенциал ионизации (случай материалов, чувствительных в инфракрасной области спектра). «Внешней» причиной его является тепловое излучение (в основном инфракрасное), испускаемое окружающей средой и воспринимаемое датчиком; ток возникает в результате фотоэффекта при чувствительности датчика к этому излучению.

В зависимости от механизмов возникновения темнового тока наблюдаются:

— чувствительность к температуре, вследствие которой возникает опасность спутать температурный дрейф тока с медленными вариациями, обусловленными сигналом;

— флуктуации около среднего значения, которые связаны с собственными шумами, которые увеличивают темновой ток и определяют предел минимальной обнаруживаемой амплитуды сигналов.

Таким образом, в общем случае выгодно выбрать и использовать такой датчик, у которого темновой ток существенно меньше минимального фототока, обусловленного сигналом. Для датчиков инфракрасного излучения обычно это приводит к необходимости помещать датчик в охлаждаемый корпус, чтобы, с одной стороны, уменьшить тепловое возбуждение материала, а с другой — ограничить поток излучения из окружающей среды.

### 5.5.2. Чувствительность

Поток излучения оптического сигнала, воспринимаемого датчиком, приводит к возникновению фототока  $I_p$ , который вместе с темновым током  $I_0$  составляет общий ток на выходе датчика:

$$I = I_0 + I_p.$$

Реакцию датчика на принимаемое излучение обычно характеризуют, исходя из фототока  $I_p$ . Эта реакция зависит, с одной стороны, от устройства датчика, а с другой — от природы излучения — его спектрального состава и величины потока.

Когда темновой ток  $I_0$  поддерживается постоянным, вариации  $\Delta I$  выходного тока датчика равны вариациям  $\Delta I_p$  фототока. Если датчик подвергается воздействию потока  $\Phi$  и выдает фототок  $I_p$ , то чувствительность датчика, которая, по определению, есть отношение вариации выходной величины  $\Delta I$  к вызвавшей ее вариации измеряемой величины  $\Delta\Phi$ , выражается формулой

$$S = \Delta I / \Delta\Phi = \Delta I_p / \Delta\Phi.$$

В зависимости от единиц, в которых измеряется поток, чувствительность выражается в А/Вт, А/лм или в А/лк, если поток оценивают по создаваемой им визуальной освещенности.

Для линейного датчика статическая чувствительность не зависит от  $\Phi$  и равна

$$S = I_p / \Phi.$$

**Спектральная чувствительность  $S(\lambda)$ .** Это — чувствительность датчика, когда воспринимаемый им поток монохроматичен; чувствительность записывается для определенной длины волны  $\lambda$

$$S(\lambda) = \Delta I_p / \Delta\Phi(\lambda)$$

и для линейного датчика равна

$$S(\lambda) = I_p / \Phi(\lambda).$$

Кривая спектральной чувствительности показывает изменения относительной чувствительности в функции длины волны:  $S(\lambda)/S(\lambda_p)$ , где  $\lambda_p$  — длина волны, соответствующая максимуму спектральной чувствительности.

Из элементарных теоретических соображений следует, что для  $\lambda > \lambda_s$  ( $\lambda_s$  — пороговая длина волны) фототок  $I_p$ , а следовательно, и чувствительность равны нулю. Для  $\lambda \leq \lambda_s$  в предполо-

**Интегральная чувствительность  $S_t$ .** Это чувствительность датчика, принимающего немонохроматический оптический сигнал. Она зависит, с одной стороны, от спектральной чувствительности датчика к различным составляющим воздействующего излучения и, с другой стороны, от спектрального распределения самого излучения. Легко получить выражение для интегральной чувствительности в функции этих факторов; для этого рассмотрим случай линейного датчика, для которого

$$S_t = I_p / \Phi.$$

Ток  $I$  является суммой токов  $dI_p(\lambda)$  от различных составляющих воздействующего излучения; если  $d\Phi(\lambda)$  есть часть потока, заключенная между  $\lambda$  и  $\lambda + d\lambda$ , то

$$dI_p(\lambda) = S(\lambda) d\Phi(\lambda), \quad \text{где} \quad d\Phi(\lambda) = \frac{d\Phi(\lambda)}{d\lambda} d\lambda.$$

Величина  $d\Phi(\lambda)/d\lambda$  — спектральная плотность потока на длине волны  $\lambda$  — позволяет выразить принимаемый интегральный поток формулой

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left\{ \frac{d\Phi(\lambda)}{d\lambda} \right\} d\lambda.$$

Здесь  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — длины волн, ограничивающие спектр воздействующего на датчик излучения.

Интегральный ток  $I_p$  описывается формулой

$$I_p = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \left\{ \frac{d\Phi(\lambda)}{d\lambda} \right\} d\lambda,$$

и теоретическое выражение для интегральной чувствительности приобретает вид

$$S_t = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) \left\{ \frac{d\Phi(\lambda)}{d\lambda} \right\} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left\{ \frac{d\Phi(\lambda)}{d\lambda} \right\} d\lambda}.$$

Очевидно, что интегральная чувствительность  $S_t$  всегда меньше, чем максимальная спектральная чувствительность  $S(\lambda_p)$ .

### 5.5.3. Обнаружительная способность

Речь идет об определении характеристик датчика в отношении его собственных шумов и способности датчика обнаруживать слабые сигналы.

Каждый тип внутреннего шума можно представить источником тока, эффективная сила тока которого равна корню квадратному из среднего квадрата шумового тока. Теоретическое

значение этого среднего квадрата вытекает из физической сущности явления, вызывающего шум. В случае оптических датчиков приходится считаться со следующими видами шумов:

а) шум, связанный с тепловым возбуждением носителей заряда в сопротивлении  $R$  (тепловой шум сопротивления, или шум Джонсона):

$$\overline{I^2_{bR}} = 4kTB/R,$$

где  $B$  — полоса пропускания измерительной схемы,  $T$  — абсолютная температура сопротивления и  $k$  — постоянная Больцмана;

б) дробовой шум, или шум Шоттки, проявляющийся при прохождении тока через потенциальный барьер:

$$\overline{I^2_{bS}} = 2qIB,$$

где  $q$  — заряд электрона и  $I$  — ток, проходящий через датчик.

в) генерационно-рекомбинационный шум носителей заряда, пропорциональный ширине полосы пропускания и зависящий от конкретного типа датчика.

Пренебрежем шумом вида  $1/f$ , что можно сделать в случае, когда используемый свет модулируется с частотой, выходящей за границу области (обычно несколько десятков герц), в которой шум вида  $1/f$  значителен.

Общий ток собственных шумов, получающийся в результате квадратичного сложения различных источников шумов, равен

$$I_b = \sqrt{\sum I^2_{bi}} = i_b \sqrt{B}.$$

По определению мощность, эквивалентная шуму (NEP — от англ. Noise Equivalent Power) — это мощность такого оптического сигнала  $P_s$ , который при  $B=1$  Гц образует на выходе датчика поток  $i_p$ , равный  $i_b$ . Мощность, эквивалентная шуму, указывает порядок минимально обнаруживаемого потока оптического излучения. Если чувствительность датчика для рассматриваемого излучения равна  $S$  ( $S=S(\lambda)$  или  $S_t$  в зависимости от того, является поток монохроматическим или немонохроматическим), то, очевидно,

$$i_p = SP_s = i_b,$$

т. е.

$$P_s = i_b/S = \text{NEP} [\text{Вт}\cdot\text{Гц}^{-1/2}].$$

Способность датчика обнаруживать слабые оптические сигналы тем выше, чем меньше NEP, поэтому более логично характеризовать эту способность величиной, обратной NEP; эта величина называется обнаружительной способностью  $D$ :

$$D = 1/\text{NEP} = S/i_b [\text{Вт}^{-1}\cdot\text{Гц}^{1/2}].$$

Чтобы иметь возможность охарактеризовать каждый тип датчика независимо от площади  $A$  фоточувствительного элемента, приводят обнаружительную способность к единичной площади. Соответствующая величина называется удельной обнаружительной способностью  $D^*$ .

Следует отметить, что элементарные шумовые токи, которые составляют общий ток шума  $I_b$ , большей частью пропорциональны корню квадратному из площади  $\sqrt{A}$ ; отсюда выражения для  $D^*$ :

$$D^* = \frac{\sqrt{A}S}{i_b} = \frac{\sqrt{A}S\sqrt{B}}{I_b} [\text{Вт}^{-1}\cdot\text{см}\cdot\text{Гц}^{1/2}],$$

$$D^* = \sqrt{A}/\text{NEP} = D \sqrt{A}.$$

В то же время для уточнения условий измерения  $D^*$  используют обозначения в скобках; например,  $D^* (500\text{ K}, 800, 1)$  означает, что цветовая температура источника излучения равна 500 К, частота модуляции составляет 800 Гц, полоса пропускания 1 Гц. Выражение  $D^* (6,3\text{ мкм}, 800, 1)$  показывает, что в данном случае величина  $D^*$  оценена по монохроматическому источнику с  $\lambda=6,3$  мкм.

## 5.6. Фоторезисторы

Сопротивление фоторезистора, являющегося резистивным датчиком, испытывает воздействие потока излучения с определенным распределением энергии по спектру. Соединенный с соответствующей схемой формирования сигнала фоторезистор является одним из самых чувствительных оптических датчиков. Физическое явление, на котором основано действие датчика, — фотопроводимость — представляет собой внутренний фотоэффект, т. е. освобождение в материале датчика электрических зарядов под действием света и обусловленное этим увеличение проводимости.

### 5.6.3. Используемые материалы

Фоточувствительные элементы фоторезисторов выполняются из полупроводниковых гомогенных материалов, поликристаллических или монокристаллических, с собственной проводимостью (чистых) или с примесной проводимостью (легированных).

К поликристаллическим материалам фоточувствительных элементов относятся CdS, CdSe, CdTe, PbS, PbSe, PbTe. В качестве монокристаллических материалов фоточувствительных элементов служат Ge и Si, чистые или легированные атомами Au, Cu, Sb, Zn, а также InSb, InAs, InP, CdHgTe.

Спектральные области, в которых чувствительны и обычно используются эти материалы, показаны на рис. 5.8. Различные примеры конструкции фоторезисторов приведены на рис. 5.9.

### 5.6.4. Характеристики фоторезисторов

**Сопротивление.** Величина темнового сопротивления  $R_{c0}$  зависит от формы, размеров, температуры и физико-химической природы фоточувствительного слоя фоторезистора. Очень высоким темновым сопротивлением (от  $10^4$  до  $10^9$  Ом при  $25^\circ\text{C}$ ) обладают PbS, CdS, CdSe. Невелико (от 10 до  $10^3$  Ом при  $25^\circ\text{C}$ ) темновое сопротивление у InSb, InAs, CdHgTe. Сопротивление  $R_c$  фоторезистора, подвергаемого облучению, быстро падает с увеличением облученности (рис. 5.10).

Свойства фоторезистора можно описать эквивалентной электрической схемой, в которой темновое сопротивление  $R_{c0}$  включено в параллель с сопротивлением  $R_{cp}$ , определяемым фотоэлектрическим действием падающего потока:

$$R_{cp} = \alpha \Phi^{-\gamma},$$

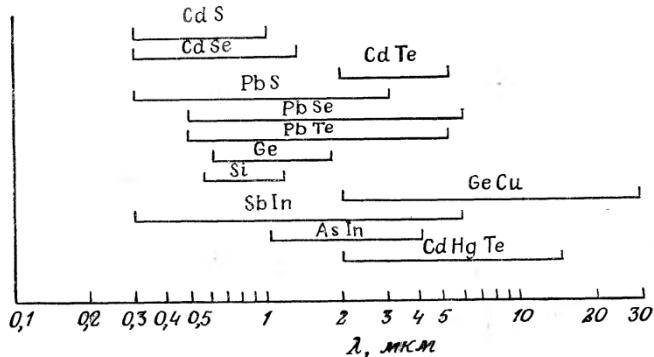


Рис. 5.8. Спектральные области применения различных фотопроводящих материалов.

где  $a$  зависит от конкретного материала, температуры и от спектра падающего излучения, а  $\gamma$  обычно имеет значение от 0,5 до 1. При этих условиях сопротивление  $R_c$  выражается формулой

$$R_c = \frac{R_{c0} R_{cp}}{R_{c0} + R_{cp}} = \frac{R_{c0} a \Phi^{-\gamma}}{R_{c0} + a \Phi^{-\gamma}},$$

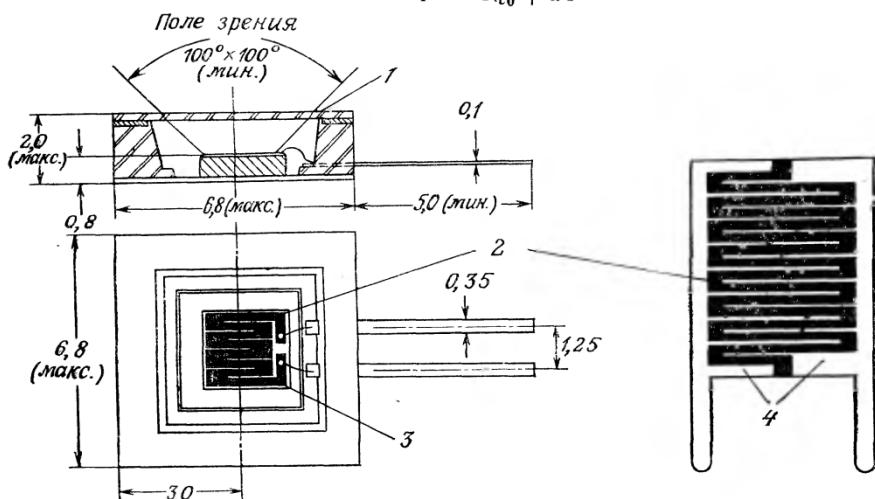


Рис. 5.9. Примеры конструкции фоторезисторов (данные RTC, размеры в мм).  
1 — RPY 78, сапфировое окно толщиной  $0,12+0,18$  мкм; 2 — фотопроводящий слой; 3 — чувствительная поверхность; 4 — электроды.

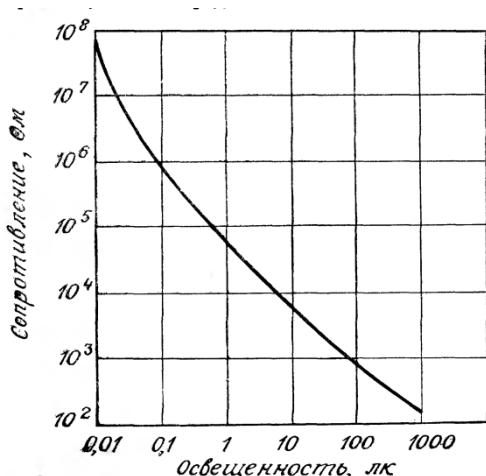


Рис. 5.10. Пример зависимости сопротивления фоторезистора от его освещенности.

и в обычных случаях, когда  $R_{cp} \ll R_{c0}$ , имеем  $R_c = a \Phi^{-\gamma}$ .

Сопротивление нелинейно зависит от падающего потока, однако эту функцию можно линеаризовать в ограниченном диапазоне с помощью постоянного сопротивления, включаемого в параллель с фоторезистором (разд. 4.2.1).

Сопротивление  $R_c$  освещенного фоторезистора зависит от температуры, однако чувствительность к температуре с ростом освещенности ослабевает.

Величина сопротивления может испытывать медленный дрейф в экстремальных условиях применения — при больших значениях потока и приложенного напряжения. Заметим, что эффект старения более ярко выражен для материалов с высоким температурным коэффициентом.

**Рассеиваемая мощность.** Максимальная рассеиваемая мощность составляет около милливатта на 1  $\text{мм}^2$  чувствительной поверхности. Изменение рассеиваемой мощности  $P_d$  в функции сопротивления  $R_c$  зависит от режима питания; если фотодиод питается постоянным напряжением  $V$ , то

$$P_d = V^2/R_c,$$

при постоянном токе питания фотодиода  $I$

$$P_d = R_c I^2,$$

а при питании источником э. д. с.  $E_s$ , включенном последовательно с сопротивлением  $R_s$ ,

$$P_d = R_c E_s^2 / (R_s + R_c)^2.$$

В этом последнем случае  $P_d \text{ макс} = E_s^2 / 4R_s$ , если  $R_c = R_s$ .

Максимальная рассеиваемая мощность лимитируется нагревом фотодиода; использование, когда это возможно, охлаждающего радиатора уменьшает рост температуры, предотвращая тем самым деградацию характеристик.

**Чувствительность.** В соответствии с эквивалентной электрической схемой фотодиода его проводимость  $G_c$  можно записать в виде

$$G_c = G_{c0} + G_{cp},$$

где  $G_{c0} = 1/R_{c0}$  — темновая проводимость, а  $G_{cp} = 1/R_{cp} = \Phi^\gamma/a$  — проводимость, вызванная фотоэлектрическим эффектом. Когда к фотодиоду приложено постоянное напряжение  $V$ , через него протекает ток  $I$ :

$$I = G_c V = G_{c0} V + G_{cp} V = I_0 + I_p,$$

где  $G_{c0} V = I_0$  — темновой ток и  $G_{cp} V = I_p$  — фототок.

Обычно при использовании фотодиода выполняется условие  $I_0 \ll I_p$ , и в этом случае

$$I = I_p = (V/a) \Phi^\gamma.$$

Кроме частного случая, когда  $\gamma = 1$ , ток  $I$  является нелинейной функцией воспринимаемого потока.

Для потока излучения известного спектрального состава статический коэффициент преобразования равен

$$I/\Phi = (V/a) \Phi^{\gamma-1},$$

а чувствительность определяется выражением

$$\Delta I / \Delta \Phi = \gamma (V/a) \Phi^{\gamma-1}.$$

Из этих формул следует, что

а) статический коэффициент преобразования и чувствительность — величины одного порядка (с учетом того факта, что значение  $\gamma$  лежит между 0,5 и 1);

б) фотодиод является нелинейным датчиком, и его чувствительность уменьшается с ростом потока, кроме частного случая, когда  $\gamma = 1$ . Однако при работе на малом участке характеристики, когда информация заключается в небольших вариациях потока около существенно большего постоянного его значения, поведение фотодиода может быть квазилинейным;

в) чувствительность, в общем, пропорциональна приложенному к фотодиоду напряжению, однако это справедливо лишь для достаточно малых напряжений, когда нагрев за счет выделения джоулева тепла не приводит к существенному повышению температуры, снижающему чувствительность (рис. 5.11).

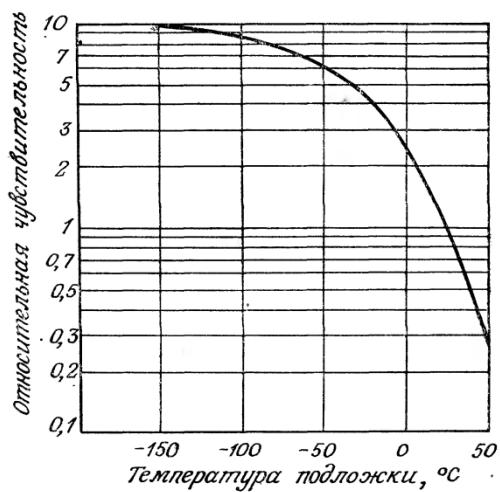


Рис. 5.11. Влияние температуры на чувствительность фотодиода из CdHgTe (данные RTC).

Спектральная чувствительность  $S(\lambda) = \Delta I / \Delta \Phi(\lambda)$  обычно выражается в относительных единицах — ординатах спектральной характеристики (рис. 5.12, а). Максимальная спектральная чувствительность в зависимости от материала фоточувствительного элемента составляет от  $10^{-1}$  до  $10^2$   $\text{A/Bt}$  при величине прило-

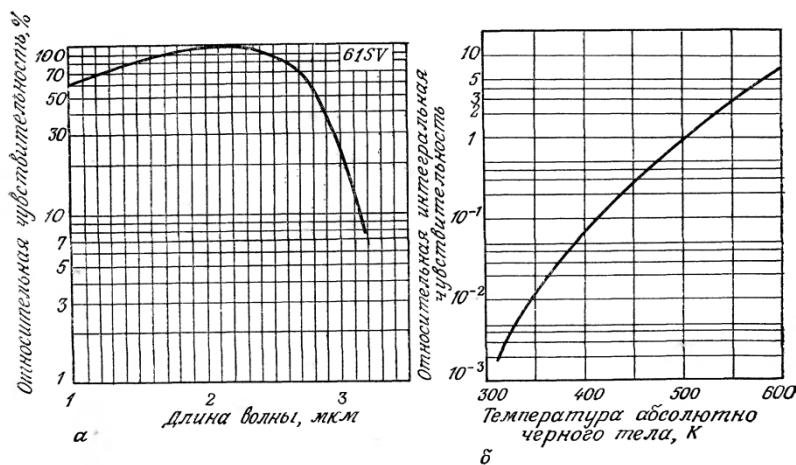


Рис. 5.12. Чувствительность фотодиода (фотодиод из PbS, данные RTC).

а — спектральная характеристика; б — изменение интегральной чувствительности в зависимости от цветовой температуры источника.

женного напряжения 10 В и площади приемной поверхности 1 см<sup>2</sup>.

Чувствительность  $S(\lambda)$  является функцией температуры; при снижении температуры, как правило, наблюдаются рост величины  $S(\lambda)$  и сдвиг пороговой длины волны в направлении, которое зависит от материала — в сторону более длинных волн для соединений свинца и в сторону более коротких волн для соединений индия.

Если излучение не монохроматическое, ток  $I_p$ , а следовательно, и интегральная чувствительность  $S_t$  зависят от спектрального распределения излучения и кривой спектральной чувствительности фотодиода (рис. 5.12, б).

**Постоянная времени.** Постоянная времени (время установления) позволяет охарактеризовать быстроту, с которой сопротивление фотодиода принимает свое новое значение при резком изменении воздействующего на него потока. Это время, необходимое для того, чтобы при ступенчатом изменении потока изменение сопротивления достигло определенного процента (например, 63%) от полной величины ступенчатого изменения. Сопротивление изменяется по времени не экспоненциально, и время установления при нарастании потока обычно меньше, чем при убывании потока. Постоянная времени фотодиода определяется физическими явлениями, обусловливающими время жизни освобожденных зарядов, и обычно оно того же порядка, что и время жизни. Коэффициент усиления  $F$  пропорционален времени жизни носителей, в связи с чем требование высокой чувствительности обычно находится в противоречии с требованием малого запаздывания. Электрическая постоянная времени определяется сопротивлениями и емкостями схемы, связанной с фотодиодом; она равна  $RC$ . Постоянная времени фотодиода, как правило, превосходит электрическую постоянную времени схемы, и тогда именно постоянная времени фотодиода определяет быстродействие приемного устройства при изменении потока.

По порядку величины постоянная времени фотодиодов зависит:

а) от природы материала фотодиодов и способов их изготовления (0,1 мкс для InSb, InAs, CdHgTe и от 0,1 до 100 мс для PbS, PbSe, CdSe);

б) от амплитуды перепада потока  $\Delta\Phi$ , воздействующего на фотодиод (постоянная времени уменьшается с ростом перепада освещенности).

Постоянная времени заметно уменьшается, когда среднее значение потока  $\Phi_0$  существенно превышает величину его изменения  $\Delta\Phi$ .

**Частотная характеристика.** При воздействии на фотодиод

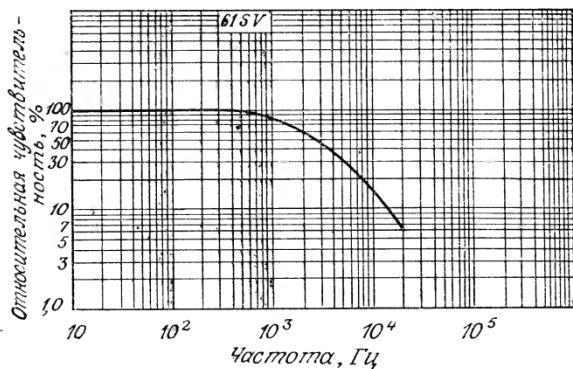


Рис. 5.13. Зависимость чувствительности от частоты модуляции оптического сигнала (фоторезистор из PbS, данные RTC).

стор периодически изменяющегося потока чувствительность  $S$  фоторезистора уменьшается, когда продолжительность освещения или затемнения становится того же порядка или меньше, чем постоянная запаздывания реакции фоторезистора на нарастание или уменьшение освещенности.

Действительно, при этих условиях ток  $I$  уже не достигает установившегося значения, соответствующего статическому режиму. В результате с ростом частоты модуляции (прерывания) света происходит уменьшение чувствительности, характеризуемое граничной частотой  $f_c$ , для которой  $S$  уменьшается на 3 дБ и которая по порядку величины равна обратному значению времени запаздывания и, следовательно, в зависимости от материала составляет от  $10^2$  до  $10^5$  Гц (рис. 5.13).

Время запаздывания уменьшается, когда вариации освещенности наложены на некоторую постоянную среднюю освещенность, и, следовательно, частотная характеристика расширяется в сторону высоких частот.

**Обнаружительная способность.** Собственные шумы датчика связаны с тепловым возбуждением (шум Джонсона) и с флуктуациями процессов генерации и рекомбинации носителей. Внешние шумы, обусловленные тепловым излучением окружающих предметов, могут стать доминирующими для датчика, чувствительного в инфракрасной области, если он не охлаждается и не снабжен охлаждаемой диафрагмой, ограничивающей поле зрения. Чтобы дать представление о порядке величин, ниже указаны значения удельной обнаружительной способности некоторых типов фоторезисторов при температуре 20°C (разработчик — RTC):

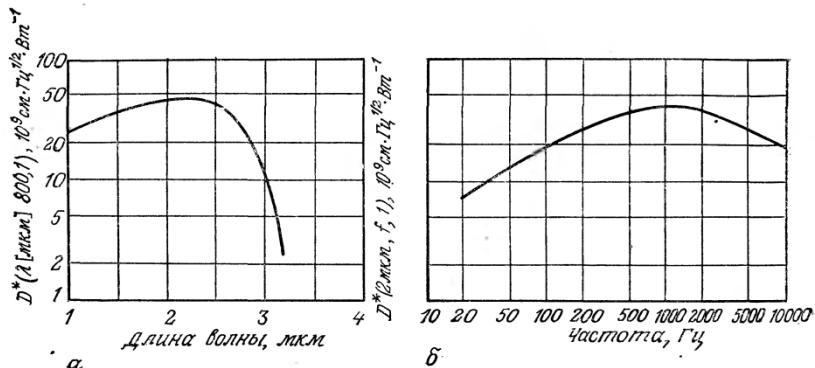


Рис. 5.14. Удельная обнаружительная способность фоторезистора (фоторезистор из PbS, данные RTC).  
а — зависимость от длины волны; б — зависимость от частоты модуляции оптического сигнала.

— фоторезистор из теллура, легированного ртутью:  
 $D^* (5 \text{ мкм}, 5000, I) = 2,5 \cdot 10^9 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ ;

Обнаружительная способность быстро уменьшается при повышении температуры фоторезистора, а также при увеличении  $\lambda$  выше значения длины волны  $\lambda_p$ , соответствующей максимуму чувствительности фоторезистора (рис. 5.14, *a*).

При возрастании тока питания  $I$  чувствительность  $S$  проходит через максимум, а шум заметно растет; таким образом, существует значение  $I$ , для которого  $D^*$  максимально. При изменении частоты модуляции  $D^*$  также проходит через максимум (рис. 5.14, *б*); это связано с ухудшением  $D^*$  на низких частотах из-за шумов вида  $1/f$  и с уменьшением  $S$  на частотах, превосходящих граничную частоту.

**Применение фоторезисторов.** В общем, достоинства фоторезисторов заключаются прежде всего в высоких значениях статического коэффициента преобразования и чувствительности, что позволяет использовать простые схемы (например, непо-

средственное управление с помощью реле). Главные недостатки фоторезисторов следующие:

- нелинейность энергетической характеристики (зависимости ток — поток);
- значительное время запаздывания и ограниченная полоса пропускания;
- нестабильность характеристик (старение);
- зависимость характеристик от температуры (как и для большинства оптических датчиков);
- необходимость охлаждения для некоторых типов фоторезисторов.

Фоторезисторы находят применение в таких исследованиях, когда не требуется прецизионных измерений, а делается оценка уровня принимаемого потока (регистрируется, например, ситуация свет — темнота или наличие светового импульса). Однако возможно использование фоторезисторов и в фотометрии при условии, что их характеристики стабилизированы и определены с высокой точностью.

Измерение сопротивления фоторезисторов или обнаружение изменения его величины осуществляется с помощью различного типа схем формирования сигналов, соединенных с резистивными датчиками (гл. 3): потенциометрической схемы, питаемой постоянным током, моста Уитстона, операционного усилителя и RC-генератора.

При использовании фоторезистора для управления, например, поток излучения, превышающий определенный порог, вызывает достаточное для возникновения тока уменьшение сопротивления, а этот ток либо непосредственно, либо после усиления осуществляет переключение устройства с двумя устойчивыми состояниями: включение или выключение реле (рис. 5.15); блокировка или открытие тиристора и т. п.

При использовании фоторезистора для приема оптических сигналов фоторезистор и его электрическая схема преобразуют

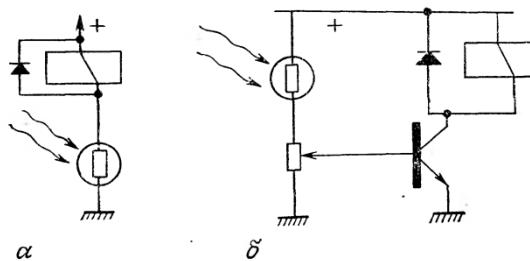


Рис. 5.15. Схема с фоторезистором для управления реле.  
а — непосредственное управление; б — управление с помощью транзисторного усилителя.

в форму электрических импульсов оптические импульсы, которые получаются, когда световой пучок попаременно прерывается или пропускается в ритме, несущем требуемую информацию (счет предметов, измерение скорости вращения диска). Импульсы напряжения, получаемые на выходе электрической схемы, из-за сравнительно большой постоянной времени фотодиода часто приходится предварительно преобразовывать с помощью триггера Шмитта для последующей обработки. Кроме того, максимальная частота световых импульсов должна быть меньше граничной частоты фотодиода.