

5.7. Фотодиоды

5.7.1. Устройство и принцип действия

Известно, что по разные стороны от перехода полупроводника p -типа к полупроводнику n -типа образуется обедненный слой с недостатком свободных носителей, и состояние равновесия поддерживается электрическим полем; благодаря наличию поля между двумя типами (p и n) полупроводникового материала устанавливается потенциальный барьер V_b (рис. 5.16).

В отсутствие приложенного внешнего напряжения ток через переход равен нулю; в действительности результирующий ток представляет собой сумму двух равных по величине и противоположных по направлению токов:

— тока основных носителей (возникающего в результате ионизации легирующей примеси — дырок в полупроводнике p -типа и электронов в полупроводнике n -типа) — носителей, у которых энергия теплового возбуждения достаточно велика, чтобы они могли преодолеть потенциальный барьер;

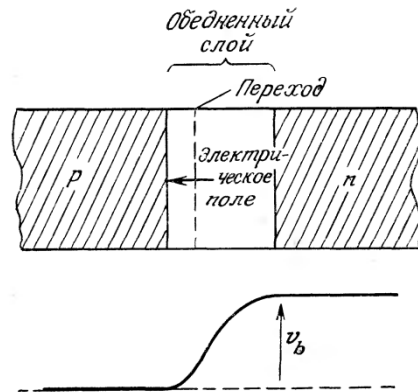


Рис. 5.16. P — n -переход и его потенциальный барьер.

— тока неосновных носителей (возникающего в результате образования пар за счет теплового возбуждения электронов в полупроводнике p -типа и дырок в полупроводнике n -типа) — носителей, которые под действием электрического поля движутся через обедненный слой.

При приложении к диоду внешнего напряжения изменяется высота потенциального барьера, что приводит к изменению тока основных носителей и ширины обедненной зоны.

Напряжение v_d , приложенное к переходу, определяет величину протекающего тока:

$$I = I_0 \exp \left\{ \frac{qv_d}{kT} \right\} - I_0.$$

При приложении обратного напряжения достаточно большой величины ($v_d \ll -\frac{kT}{q} = -26$ мВ при 300 К) высота потенциального барьера становится настолько значительной, что ток основных носителей оказывается пренебрежимо малым, и обратный ток диода определяется током неосновных носителей I_0 :

$$I_r = I_0.$$

Когда фотодиод подвергается воздействию излучения с длиной волны $\lambda \leq \lambda_s$ (λ_s — пороговая длина волны), образуются пары электрон — дырка. Чтобы эти носители могли внести вклад в протекающий ток, нужно, чтобы они не рекомбинировали; для этого они должны быть быстро разделены под воздействием поля. Это возможно только в обедненном слое (слое пространственного заряда), и перемещение указанных зарядов в том же направлении, в котором перемещаются и неосновные носители, приводит к увеличению обратного тока I_r (рис. 5.17).

Падающее излучение должно достигать обедненного слоя, проходя через освещенный полупроводниковый слой без заметного ослабления. Уменьшение потока Φ при прохождении толщины x описывается формулой $\Phi(x) = \Phi_0 \exp(-\alpha x)$, где коэффициент α имеет порядок 10^5 см^{-1} , что соответствует ослаблению до 63% при прохождении толщины порядка 10^3 \AA .

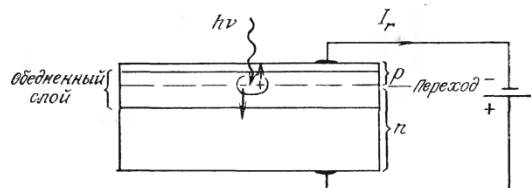


Рис. 5.17. Возникновение электронно-дырочных пар в обедненном слое p — n -перехода вследствие фотоэффекта.

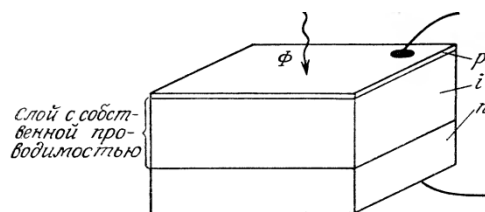


Рис. 5.18. Структура p — i — n -фотодиода.

Таким образом, необходимо, чтобы пластина освещаемого полупроводника была очень тонкой и чтобы через нее проходила большая часть падающей энергии, а обедненный слой был толстым для максимального поглощения излучения.

Эти замечания особенно существенны в случае p — i — n -фотодиодов, в которых материал с малой собственной проводимостью (i -слой) заключен между полупроводниковыми слоями p - и n -типа (рис. 5.18).

Распространение обедненного слоя (слоя пространственного заряда) внутрь материала пропорционально удельному сопротивлению материала; особенно широк этот слой, следовательно, на границах p — i и i — n . Обратное напряжение в несколько вольт достаточно, чтобы обедненная область распространилась на весь полупроводниковый i -слой.

В качестве материалов фотодиодов используются:

а) кремний и германий — для применения в видимой и ближней инфракрасной областях;

б) GaAs, InAs, InSb, HgCdTe — для применения в инфракрасной области.

5.7.2. Режимы работы

Фотодиодный режим. Принципиальная схема фотодиода характеризуется наличием источника э. д. с. E_s , напряжение которого приложено к фотодиоду в обратном направлении, и резистора R_m , на клеммах которого получается выходной сигнал (рис. 5.19, а).

Когда к фотодиоду приложено напряжение смещения $v_d < 0$, обратный ток, протекающий через фотодиод, равен

$$I_r = -I_0 \exp\left(\frac{qv_d}{kT}\right) + I_0 + I_p,$$

где I_p — фототок, возникающий в обедненном слое под действием потока, прошедшего расстояние X в области p :

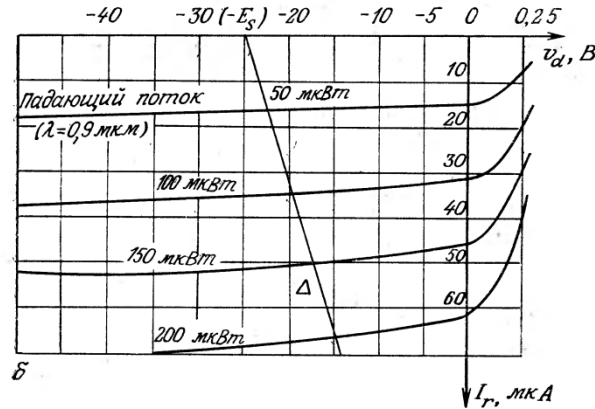
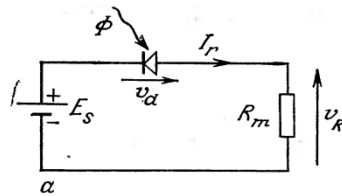


Рис. 5.19. Фотодиодный режим (данные Hewlett — Packard, фотодиоды типа 5082-4200).

a — принципиальная схема; *б* — семейство вольт-амперных характеристик при различных значениях падающего потока и нагрузочная прямая Δ .

$$I_p = \frac{qn(1-R)\lambda}{hc} \Phi_0 \exp(-\alpha X)$$

(расшифровка обозначений в этой формуле была дана ранее).

При достаточно большом обратном напряжении v_d экспоненциальный член становится пренебрежимо малым, и

$$I_r = I_0 + I_p.$$

Из соответствующей эквивалентной электрической схемы следует

$$E_s = v_R - v_d, \text{ где } v_R = R_m I_r,$$

и на семейство кривых (I_r, v_d) фотодиода можно нанести прямолинейную характеристику нагрузки Δ (рис. 5.19, б):

$$I_r = E_s/R_m + v_d/R_m.$$

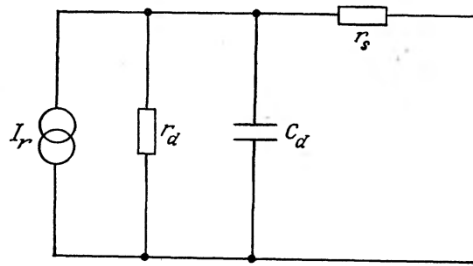


Рис. 5.20. Эквивалентная электрическая схема фотодиода.

Рабочая точка Q фотодиода определяется пересечением характеристики нагрузки и соответствующей данному падающему потоку характеристики фотодиода. Описываемый фотодиодный режим работы — линейный. Действительно, величина v_R , как и I_r , пропорциональна потоку.

Для исследования особенностей поведения фотодиода его можно представить эквивалентной электрической схемой (рис. 5.20). Эта схема содержит:

- источник тока $I_r = I_0 + I_p$;
- резистор с сопротивлением r_d , включенный в параллель с источником тока и соответствующий динамическому сопротивлению перехода (в фотодиодном режиме фотодиод смещен в обратном направлении, так что r_d — очень большая величина, порядка 10^{10} Ом);
- резистор с сопротивлением r_s , включенный последовательно с нагрузкой и соответствующий сопротивлению полупроводниковых слоев между выводами фотодиода и обедненным слоем (r_s — величина порядка десятков ом, т. е. r_s обычно пренебрежимо мало по сравнению с сопротивлением нагрузки R_m);
- емкость C_d , параллельную r_d , которая определяет электрические характеристики перехода в переходном режиме или на высоких частотах. Эта емкость величиной порядка десяти пикофарад в отсутствие приложенного напряжения, при приложении к фотодиоду обратного напряжения (фотодиодный режим), заметно уменьшается, так как под действием обратного напряжения расширяется обедненный слой (рис. 5.21).

Фотогальванический режим. Фотодиод не имеет какого-либо внешнего источника питания, он работает как преобразователь энергии и эквивалентен генератору, характеризующемуся либо напряжением холостого хода, либо током короткого замыкания.

Напряжение холостого хода V_{co} . Увеличение тока I_p неосновных носителей под действием падающего потока вызывает перенос заряда, что понижает потенциальный барьер на Δv_b .

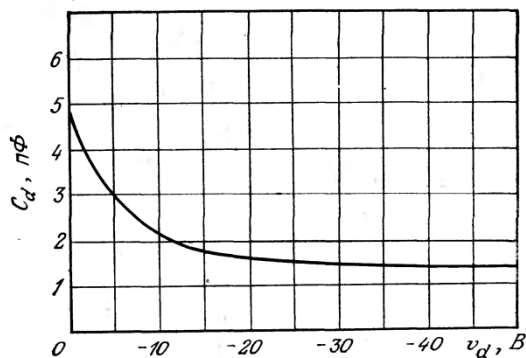


Рис. 5.21. Зависимость емкости фотодиода от приложенного обратного напряжения (данные Hewlett — Packard, фотодиоды типа 5082-4200).

Это понижение приводит к увеличению тока неосновных носителей и поддерживает равенство основных и неосновных носителей таким образом, что $I_r = 0$, т. е.

$$-I_0 \exp\left(\frac{q\Delta v_b}{kT}\right) + I_0 + I_p = 0,$$

откуда следует

$$\Delta v_b = \frac{kT}{q} \lg(1 + I_p/I_0),$$

где

$$I_p = \frac{q\eta(1-R)\lambda}{hc} \Phi_0 \exp(\alpha X).$$

Понижение потенциального барьера на Δv_b можно измерить на выводах фотодиода в разомкнутой цепи (на холостом ходу):

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \lg(1 + I_p/I_0).$$

При очень малой облученности

$$I_p \ll I_0 \quad \text{и} \quad V_{co} = \frac{kT}{q} \frac{I_p}{I_0}.$$

Напряжение V_{co} в этом случае мало ($kT/q = 26$ мВ при $T = 300$ К) и представляет собой линейную функцию принимаемого фотодиодом потока.

При больших значениях облученности

$$I_p \gg I_0 \quad \text{и} \quad V_{co} = \frac{kT}{q} \lg(I_p/I_0).$$

Напряжение V_{co} в этом случае существенно выше (от 0,1 до 0,6 В), но оно является логарифмической функцией воспринимаемого потока (рис. 5.22).

Эквивалентная схема фотодиода, приведенная выше, справедлива и здесь, однако емкость C_d в фотогальваническом режиме существенно (в 5–10 раз) выше, чем в фотодиодном режиме.

Напряжение V_{co} обычно измеряют в схеме, в которой сопротивление нагрузки R_m намного больше сопротивления r_d .

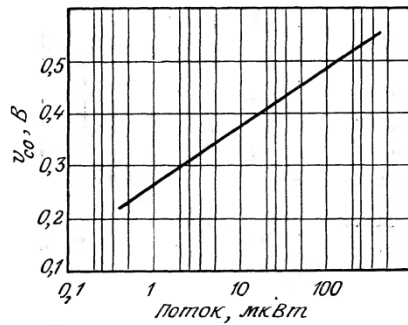


Рис. 5.22. Зависимость напряжения холостого хода от падающего потока (фотодиод типа FRT 102 в фотогальваническом режиме, данные Fairchild).

Прямая нагрузка на графике характеристик фотодиода, относящемся к фотогальваническому режиму (рис. 5.23), описывается уравнением

$$R_m I_r = v_d,$$

а рабочая точка Q есть пересечение нагрузочной характеристики Δ и характеристики фотодиода для данного падающего потока; эта точка тем ближе к оси v_d , чем больше сопротивление R_m .

Ток короткого замыкания I_{cc} . Если к выводам фотодиода присоединить нагрузку R_m , малую по сравнению с r_d , то протекающий через R_m ток практически равен I_p — току короткого замыкания; этот ток пропорционален падающему потоку (рис. 5.24).

Рабочая точка Q определяется так же, как и в предыдущем случае; она оказывается тем ближе к оси I_r , чем меньше R_m .

Важной особенностью этого режима работы является отсутствие темнового тока; действительно, без внешнего источника питания в темноте через диод ток не протекает, при этом снижается дробовой шум и можно измерять очень слабые потоки¹⁾.

Описанные выше характеристики работы фотодиода на двух различных режимах сведены в табл. 5.2.

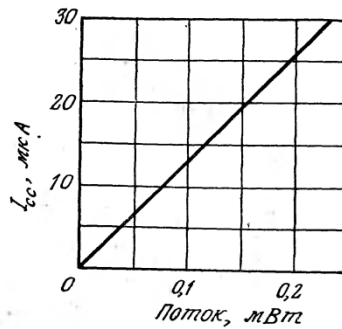


Рис. 5.24. Зависимость тока короткого замыкания от падающего потока (фотодиод типа FRT 102 в фотогальваническом режиме, данные Fairchild).

Таблица 5.2. Характеристики фотодиода

| Излучение | Фотодиодный режим (источник питания обеспечивает обратное смещение) | Фотогальванический режим (источник пи- тания отсутствует) |
|--------------------|--|--|
| Малый поток | $I_r = I_0 + I_p$ | $V_{co} = \frac{kT}{q} \lg \frac{I_p}{I_0}, I_{cc} = I_p$ |
| Большой по- ток | $I_r = I_p$ | $V_{co} = \frac{kT}{q} \lg \frac{I_p}{I_0}, I_{cc} = I_p$ |
| | Емкость C_d мала | Емкость C_d значительна |

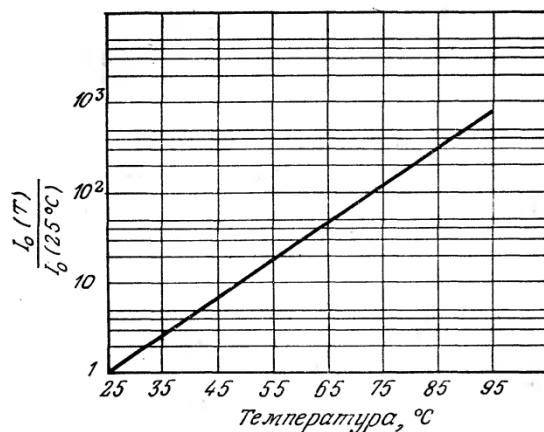


Рис. 5.25. Зависимость темнового тока от температуры (данные Hewlett — Packard, фотодиоды типа 5082-4200).

5.7.3. Темновой ток

В фотодиодном режиме при комнатной температуре темновой ток I_0 имеет порядок наноампер. Фототок I_p такого порядка соответствует очень слабому падающему потоку (от 10^{-8} до 10^{-10} Вт в зависимости от типа фотодиода). Однако темновой ток I_0 быстро возрастает при росте температуры (рис. 5.25). Из приведенной выше формулы для напряжения V_{c0} в фотогальваническом режиме видно, что значение V_{c0} также весьма чувствительно к температуре (температурный коэффициент $(1/V_{c0}) \cdot (dV_{c0}/dT)$ порядка $-0,8\%/^{\circ}\text{C}$).

5.7.4. Чувствительность

В случае излучения определенного спектрального состава фототок I_p с очень высокой точностью пропорционален падающему потоку; линейность подтверждена в очень широком диапазоне изменения потока, охватывающем 5–6 порядков. Связь спектральной чувствительности с фототоком выражается формулой, которая уже приводилась в разд. 5.7.2:

$$S(\lambda) = \frac{\Delta I_p}{\Delta \Phi} = \frac{q\eta(1-R)\exp(-\alpha X)}{hc} \lambda \quad \text{для } \lambda \leq \lambda_s.$$

Характер зависимости $S(\lambda)$ определяется влиянием λ на квантовый выход η , коэффициент отражения R и показатель поглощения α . Для каждого типа фотодиода разработчик паспортизирует спектральную чувствительность, приводя, с одной стороны, кривую относительной спектральной чувствительности

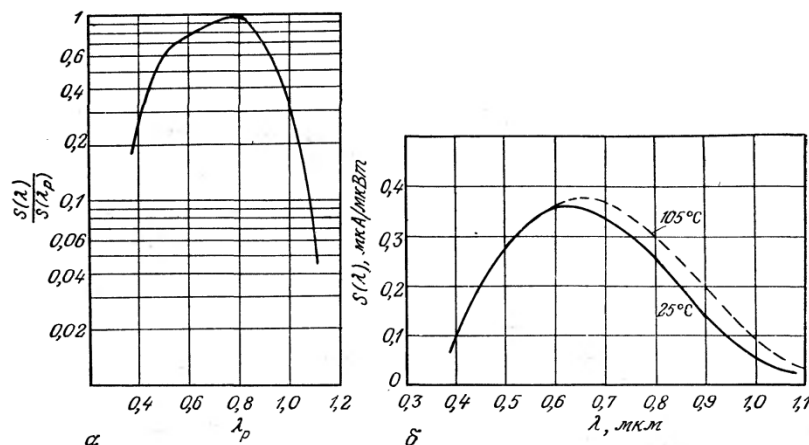


Рис. 5.26. Спектральная чувствительность фотодиода.

a — характеристика спектральной чувствительности (данные Hewlett — Packard, фотодиоды типа 5082-4200, $S(\lambda_p) = 0,5$ мкА/мкВт); b — влияние температуры (данные Texas Instruments).

$S(\lambda)/S(\lambda_p)$, где λ_p — длина волны, соответствующая максимуму спектральной чувствительности (рис. 5.26, а), и указывая, с другой стороны, абсолютную величину $S(\lambda_p)$. Эта последняя величина обычно лежит в диапазоне от 0,1 до 1 А/Вт, но, учитывая порядок величин, ее чаще выражают в мкА/мкВт. Идентичность выражений для фототока I_p в фотодиодном и фотогальваническом режимах ($I_{c0}=I_p$) указывает с очевидностью, что и спектральная чувствительность в этих двух режимах одинакова.

Под влиянием температуры происходят небольшие изменения спектральной чувствительности — с ростом температуры λ_p несколько сдвигается в сторону более длинных волн (рис. 5.26, б). Температурный коэффициент фототока $(1/I_p) \cdot (dI_p/dT)$ имеет порядок 0,1%/°С.

5.7.5. Время запаздывания

Фототок появляется очень быстро после начала освещения — время запаздывания t_{dm} составляет $\sim 10^{-12}$ с. Однако скорость нарастания измеряемого тока, определяемая временем установления t_m (или скорость спада при выключении освещения, определяемая соответствующим временем спада t_c), зависит от эквивалентной электрической схемы фотодиода и от связанной с ним измерительной схемы. Обычно временные характеристики определяются резистором R_m и включенной параллельно с ним емкостью C_p , связанной с паразитными емкостями, например, емкостью кабелей (рис. 5.27, а).

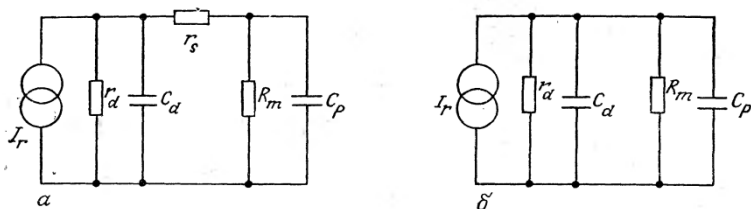


Рис. 5.27. Эквивалентная электрическая схема включения фотодиода. а — полная схема; б — упрощенная схема.

Для оценки порядка величин и упрощения формул можно пренебречь сопротивлением r_s , которое обычно не превышает нескольких десятков ом (рис. 5.27, б). При этих условиях постоянная времени схемы выражается формулой

$$\tau = (C_d + C_p) \frac{r_d R_m}{r_d + R_m},$$

т. е. для $R_m \ll r_d \approx 10^{11}$ Ом

$$\tau = (C_d + C_p) R_m.$$

Таким образом, величина τ и связанные с нею времена нарастания и спада (t_m и t_c) зависят от режима работы фотодиода, определяющего величину C_d , и от сопротивления нагрузки R_m .

Для фотодиода типа 4203, используемого в схеме с $C_p = 2$ пФ и $R_m = 50$ Ом, разработчик (Hewlett — Packard) указывает в фотодиодном режиме $t_m = t_c = 2,2\tau < 1$ нс и в фотогальваническом режиме $t_m = t_c = 2,2\tau = 300$ нс.

В фотодиодном режиме уменьшение емкости C_d в результате приложения обратного напряжения вызывает значительное уменьшение постоянной времени, и, следовательно, этот режим работы особенно подходит, когда поток излучения поступает в виде очень коротких импульсов (например, лазерных).

5.7.6. Частотная характеристика

Фотодиод и связанная с ним схема образуют систему первого порядка, к которой непосредственно применимы результаты, полученные в разд. 2.4.3 и 2.5.2. Амплитуда V_1 напряжения на нагрузке R_m выражается формулой

$$V_1 = S\Phi_1 R_m \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_c)^2}},$$

где S — чувствительность фотодиода к падающему потоку с амплитудой Φ_1 и частотой модуляции f .

Граничная частота схемы f_c обратно пропорциональна τ , t_m и t_c :

$$f_c = \frac{2}{2\pi\tau} = \frac{1}{2\pi(C_d + C_p)R_m} = \frac{0,35}{t_m}.$$

Таким образом, граничная частота, как и время запаздывания, зависит от режима работы (в фотодиодном режиме граничная частота возрастает благодаря малой величине C_d) и от сопротивления нагрузки R_m (чем меньше R_m , тем больше f_c , рис. 5.28).

5.7.7. Шум и обнаружительная способность

Различными источниками тока шума в фотодиоде являются:

а) дробовой шум

$$\overline{I_{bs}^2} = 2q(I_0 + I_{pm})B,$$

где q — заряд электрона, I_0 — темновой ток, I_{pm} — фототок, вызванный потоком излучения, B — полоса пропускания;

б) тепловой шум (шум Джонсона)

$$\overline{I_{bR}^2} = 4kTB/r_d,$$

где k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура фотодиода и r_d — динамическое сопротивление p — n -перехода;

в) генерационно-рекомбинационные шумы и шумы типа $1/f$, существенные только на низких частотах (намного меньших, чем обычно применяемые частоты модуляции).

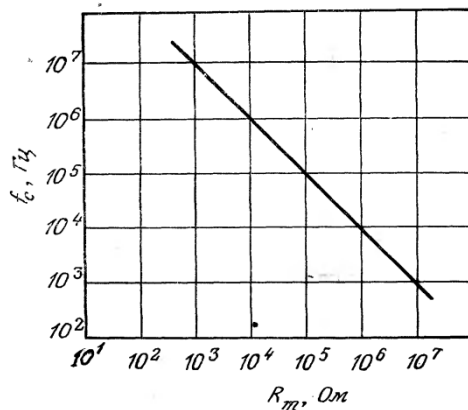


Рис. 5.28. Зависимость граничной частоты от сопротивления нагрузки (данные Hewlett — Packard, фотодиод типа 5082-4207).

Указанным источникам шума соответствует общий ток собственного шума I_{bd} , который определяет обнаружительную способность фотодиода D^* .

По порядку величины обнаружительная способность при нормальных условиях применения фотодиода в зависимости от его типа лежит между 10^{10} и 10^{13} Вт⁻¹·см·Гц^{1/2}. Обнаружительная способность является функцией длины волны и имеет максимальное значение на длине волны, соответствующей максимуму спектральной характеристики λ_p . D^* возрастает с понижением температуры фотодиода.

Сравнение величин общего тока собственного шума I_{bd} , определяющего обнаружительную способность, и тока дробового шума I_{bs} , рассчитанного исходя из темнового тока I_0 , показывает, что этот последний и является главной причиной шума фотодиода. Так, например, для кремниевого фотодиода типа

Использование фотодиода в фотогальваническом режиме ($I_0=0$) позволяет устранить доминирующий источник шума, связанный с темновым током; считается, что этот режим наиболее подходит для обнаружения оптических сигналов низкого уровня.

Влияние сопротивления нагрузки R_m . Нагрузка R_m включена последовательно с сопротивлением r_s фотодиода; в совокупности эти сопротивления обуславливают шум, спектральная плотность которого равна

$$\overline{i_{bR}^2} = \overline{I_{bR}^2}/B = 4kT/(R_m + r_s)$$

и, следовательно, в часто встречающемся случае, когда $R_m \gg r_s$,

$$\overline{i_{bR}^2} = 4kT/R_m.$$

5.7.8. Схема, связанная с фотодиодом

Режим работы фотодиода выбирают в зависимости от требуемых характеристик и задачи проводимых исследований.

Фотодиодный режим. Его отличительными особенностями являются линейность, малое время запаздывания и широкая полоса пропускания. Примерами измерительных сил для определения обратного тока I_r могут служить:

а) Основная схема (рис. 5.30, а),

$$v_0 = R_m (1 + R_2/R_1) I_r.$$

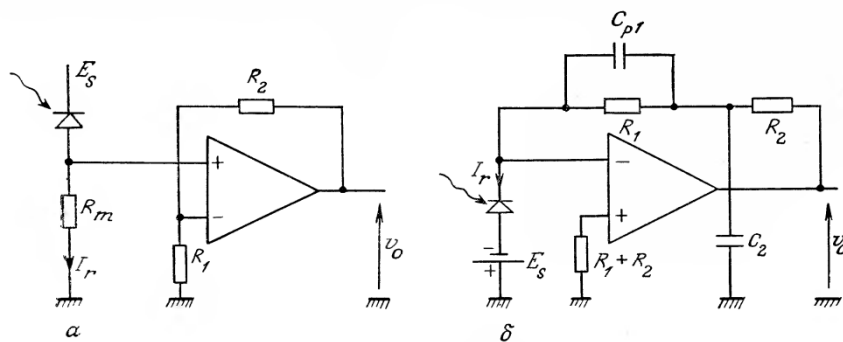


Рис. 5.30. Схемы измерений в фотодиодном режиме.
а — основная схема; б — схема с высоким быстродействием.

Увеличение сопротивления R_m в этой схеме позволяет уменьшить шум, но ценой ухудшения быстродействия. Большой входной импеданс усилителя позволяет избежать уменьшения эффективной нагрузки фотодиода.

б) Схема с высоким быстродействием (рис. 5.30, б),

$$v_o = (R_1 + R_2) I_r.$$

Сопротивление нагрузки фотодиода в этой схеме мало и равно сопротивлению $(R_1 + R_2)$, деленному на коэффициент усиления разомкнутого контура усилителя на рабочей частоте. Дополнительная емкость C_2 компенсирует действие паразитной емкости C_p при условии $R_1 C_{p1} = R_2 C_2$. Используемые усилители должны иметь очень малый входной ток и пониженный температурный дрейф.

Фотогальванический режим. Отличительными особенностями этого режима являются линейная или логарифмическая реакции

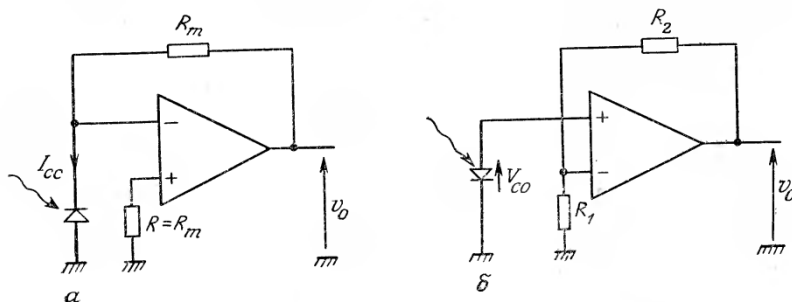


Рис. 5.31. Схемы измерений в фотогальваническом режиме.
а — схема, обеспечивающая линейную реакцию; б — схема, обеспечивающая логарифмическую реакцию.

в зависимости от нагрузки, минимальный фоновый шум, сравнительно большое время запаздывания и уменьшенная полоса пропускания, а также существенная температурная зависимость характеристики при логарифмической реакции. Для реализации этого режима используются

а) схема с линейным выходом — измерение тока короткого замыкания I_{cc} (рис. 5.31, а),

$$v_o = R_m I_{cc};$$

б) схема с логарифмическим выходом — измерение напряжения холостого хода V_{co} (рис. 5.31, б),

$$v_o = \{1 + R_2/R_1\} V_{co}.$$