

5.8. Лавинные фотодиоды

5.8.1. Физический принцип действия. Коэффициент умножения

При приложении к фотодиоду обратного напряжения, величина которого на несколько десятых вольта меньше напряжения пробоя V_B , возникшим за счет фотоэлектрического эффекта носителям сообщается энергия, достаточная для ударной ионизации атомов в зоне перехода и создания новых электронно-дырочных пар, которые при своем движении будут вновь воспроизводить указанный процесс. При этом происходит умножение носителей, и в фотодиоде будет наблюдаться лавинный процесс. В результате этого лавинного процесса фотоэлектрический ток усиливается с коэффициентом умножения M , зависящим от обратного напряжения $v_r = -v_d$:

$$M = K(1 - v_r/V_B)^{-1}.$$

Константа K зависит от конструкции фотодиода. Напряжение пробоя V_B лежит в пределах от 100 до 200 В в зависимости от типа фотодиода, но разброс величины V_B для одного и того же типа фотодиода довольно значителен и составляет $\pm 20\%$ от номинала. Коэффициент умножения M достигает значений порядка 10^3 (рис. 5.32). Напряжение V_B является функцией температуры (для кремниевых фотодиодов $dV_B/dT = 200$ мВ/°С), так что коэффициент M при постоянном напряжении питания v_r также зависит от температуры. Температурную стабилизацию коэффициента умножения M можно осуществить с помощью регулирующей схемы, изменяющей соответствующим образом напряжение на клеммах фотодиода при изменении температуры.

5.8.2. Темновой ток

Темновой ток I_0 представляет собой сумму поверхностного I_{0s} и объемного I_{0v} темновых токов; только этот последний участвует в лавинном процессе (и умножается в M раз):

$$I_0 = I_{0s} + MI_{0v}.$$

Например, для фотодиода типа TIED 59 (разработчик — фирма Texas Instruments) при 25 °С $I_{0s} = 2$ нА, $I_{0v} = 60$ пА, так что $I_0 = 8$ нА при $M = 100$ и $I_0 = 38$ нА при $M = 600$. Темновой ток растет с температурой.

5.8.3. Чувствительность

Таким образом, фототок в лавинном фотодиоде умножается на M , что существенно повышает чувствительность. Чувствительность в максимуме $S(\lambda_p)$ по порядку величины составляет $1 \div 10^2$ А/Вт.

Отметим, что спектральная чувствительность лавинного фотодиода зависит от частоты модуляции, поскольку от этой частоты зависит M (рис. 5.33).

5.8.4. Быстродействие

Как и для фотодиода, время нарастания и спада связано с временем запаздывания электрической схемы τ :

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

где C_d — емкость перехода, C_p — совокупность паразитных емкостей, R_m — сопротивление нагрузки.

Емкость C_d уменьшается по мере увеличения приложенного к фотодиоду обратного напряжения, и очень малое ее значение (порядка пикофард) при высоких используемых обратных напряжениях позволяет обеспечить высокое быстродействие.

5.8.5. Частотная характеристика

Эта характеристика определяется, с одной стороны, элементами схемы, от которых зависит граничная частота $f_c = 1/2\pi(C_d + C_p)R_m$, а с другой стороны, — уменьшением коэффициента умножения M на высоких частотах. Применение низкоомной нагрузки R_m при небольших значениях C_d позволяет получить широкую полосу пропускания; так, при $C_d = 4$ пФ, $C_p = 2$ пФ и $R_m = 50$ Ом имеем $f_c = 530$ МГц.

Зависимость коэффициента умножения M от частоты модуляции оптического сигнала связана с постоянством произведения Коэффициент умножения \times Полоса пропускания $= F_1$. На низких частотах коэффициент умножения максимален и является практически постоянной величиной (равной $M(0)$) вплоть до некоторой граничной частоты $f'_c = F_1/M(0)$ частотной характеристики коэффициента умножения.

На частотах выше f'_c коэффициент умножения уменьшается по закону

$$M(f) = F_1/f.$$

Частота модуляции, для которой $M=1$, равна, следовательно, F_1 .

Частота «единичного» умножения F_1 составляет $10 \div 10^2$ ГГц, граничная частота частотной характеристики коэффициента умножения $f'_c = 10^2 \div 10^3$ МГц.

5.8.6. Шумы. Обнаружительная способность

При величине коэффициента умножения лавинного фотодиода M мощность шума возрастает в M^p раз, где $p=2,3$, тогда как мощность сигнала умножается на M^2 . На практике для фотодиода доминирующим является шум сопротивления нагрузки R_m , и умножение на M^p шума фотодиода не оказывает заметного влияния на общий шум. Следовательно, вообще говоря, в результате лавинного умножения отношение сигнала к шуму улучшается.

Величина обнаружительной способности лавинных фотодиодов имеет тот же порядок, что и у обычных фотодиодов: D^* составляет от 10^9 до 10^{13} см \cdot Гц $^{1/2}$ \cdot Вт $^{-1}$.

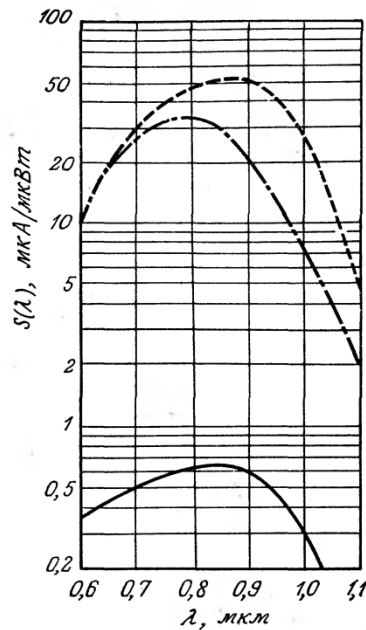


Рис. 5.33. Сравнение спектральных характеристик обычного и лавинного кремниевых фотодиодов.

— обычный фотодиод (Fairchild, FRT 102; лавинный фотодиод (Texas Instruments, TIED 55); — — частота модуляции меньше 100 кГц, — · — частота модуляции 10 МГц.

5.8.7. Электрические схемы лавинных фотодиодов

Это такие же схемы, которые используются при включении обычных фотодиодов в фотодиодном режиме, однако существенно более высокая чувствительность лавинных фотодиодов позволяет при том же выходном напряжении усилителя использовать электрическую цепь или нагрузку с меньшим сопротивлением, повышая тем самым быстродействие и расширяя полосу пропускания.

5.9. Фототранзистор

5.9.1. Устройство и принцип действия

Речь идет о транзисторе (обычно кремниевом или типа $n-p-n$), полупроводниковый элемент которого, представляющий базу, может быть освещен. Электрически к этому элементу подключаться нельзя, и какое-либо внешнее питание обычно подключают между коллектором и эмиттером (рис. 5.34, а). При этом напряжение, приложенное к $p-n$ -переходу база — коллектор, создает обратное смещение, тогда как разность потенциалов между эмиттером и базой сколько-нибудь заметно не меняется ($0,6 \leq V_{be} \leq 0,7$ В).

Когда область близ перехода база — коллектор освещается, транзистор ведет себя как фотодиод в фотодиодном режиме (см. разд. 5.7.2), ток которого $I_r = I_0 + I_p$. Здесь I_0 — обратный темновой ток, а $I_p = [q\eta(1-R)\exp(-\alpha X)\lambda\Phi_0]/hc$ — фототок, возникающий под действием падающего монохроматического потока Φ_0 (с длиной волны λ , меньшей, чем пороговая длина волны λ_{sp}), который прошел через слой базы толщиной X . Ток I_r играет

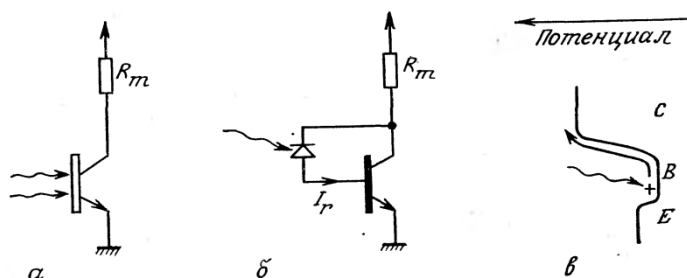


Рис. 5.34. Фототранзистор.

а — электрическая схема; *б* — эквивалентная схема; *в* — разделение освобожденных носителей при освещении базы.

роль тока базы и вызывает за счет транзисторного эффекта появление тока коллектора I_c :

$$I_c = (\beta + 1) I_r = (\beta + 1) I_0 + (\beta + 1) I_p.$$

Здесь β — коэффициент усиления по току транзистора в режиме с общим эмиттером, $(\beta + 1) I_0 = I_{c0}$ — темновой ток фототранзистора, $(\beta + 1) I_p = I_{cp}$ — ток коллектора, вызванный падающим потоком.

Таким образом, фототранзистор можно рассматривать как фотодиод, соединенный с транзистором (рис. 5.34, б): первый выдает с базы фототок I_b , а второй обеспечивает усиление β .

Более углубленное рассмотрение описываемых явлений показывает, что электрон и дырка каждой возникшей под действием излучения пары разделяются электрическим полем, существующим на переходе база — коллектор. В случае $n-p-n$ транзистора электроны притягиваются коллектором, тогда как дырки скапливаются в области базы (рис. 5.34, в). Результат при этом выглядит таким же, как если бы дырки инжектировались в базу внешним источником: потенциал базы увеличивается, что вызывает понижение потенциального барьера эмиттер — база, вследствие чего возникает электронный ток I_E от эмиттера к базе, через которую электроны диффундируют к коллектору.

Электрическая эквивалентная схема фототранзистора, работающего на малом участке характеристики, представляет собой модифицированную схему Джаколетто, в которой между истинной базой B' и коллектором C помещен источник фототока I_p ; когда база электрически не подсоединена, схема приобретает вид, показанный на рис. 5.35.

В случае низких частот, пренебрегая емкостями $C_{b'e}$ и $C_{b'c}$, получим для напряжения v_m на нагрузке R_m (которую выбирают малой по сравнению с r_{ce}):

$$v_m = -(g_m v_{b'e} + I_p) R_m,$$

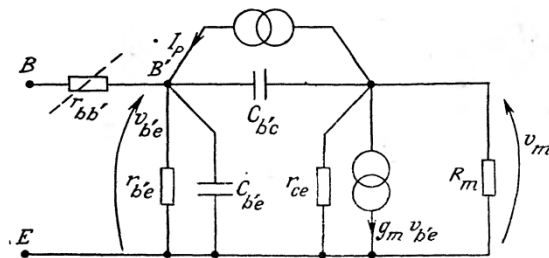


Рис. 5.35. Эквивалентная электрическая схема Джаколетто для фототранзистора с неподсоединенной базой.

где $v_{be} = r_{be} I_p$ и $g_m = \beta / r_{be}$,

откуда $v_m = -(\beta + 1) I_p R_m$.

Таким образом, на низких частотах фототранзистор можно уподобить источнику тока $(\beta + 1) I_p$.

5.9.2. Темновой ток

Темновой ток I_{co} при 25°C имеет порядок 10^{-8} — 10^{-9} А; он зависит от напряжения коллектор — эмиттер и от температуры (рис. 5.36). Если к базе можно подсоединиться, то темновой ток удастся уменьшить, вводя в цепь базы большое сопротивление.

5.9.3. Чувствительность

Воспринимая поток Φ_0 с длиной волны меньше пороговой, диод база — коллектор дает фототок I_p , который вызывает в фототранзисторе ток $I_{cp} = (\beta + 1) I_p$; подставляя сюда выражение для I_p (см. разд. 5.7.2), получим:

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

Семейство кривых $I_c = f(V_{CE})$ выглядит так же, как для обычного транзистора, только параметр I_B заменяется падающим потоком Φ_0 или освещенностью E_0 (рис. 5.37).

Для заданного потока Φ_0 кривая спектральной чувствительности зависит от вида диода база — коллектор; основным материалом обычно является кремний с различными легирующими примесями (рис. 5.38). Коллекторный ток I_c для определенной длины волны не является идеальной линейной функцией потока или освещенности, так как коэффициент усиления β зависит от тока I_c и, соответственно, от воспринимаемого потока; следова-

тельно, чувствительность $\Delta I_c / \Delta \Phi_0$ зависит от Φ_0 . Так, для фототранзистора типа BPW 22 (изготовитель — фирма RTC — Comperelec) чувствительность возрастает в 1,6 раза при увеличении освещенности от 1 до 8 мВт/см². Порядок величины спектральной чувствительности в максимуме $S(\lambda_p)$ составляет от 1 до 100 А/Вт.

Интегральную чувствительность обычно определяют для излучения вольфрамовой нити с цветовой температурой около 2850 К. Интегральная чувствительность меньше спектральной в отношении, зависящем от граничной длины волны. Для кремниевых фототранзисторов это отношение находится в диапазоне от 3 до 10, и интегральная чувствительность в практически используемом диапазоне изменяется пропорционально цветовой температуре нити (рис. 5.39, а). Как интегральная, так и спектральная чувствительности зависят от падающего потока (рис. 5.39, б).

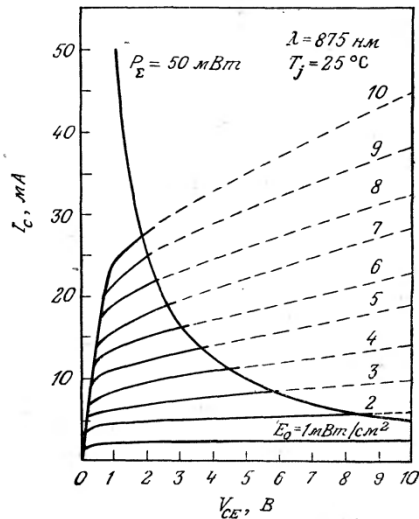


Рис. 5.37. Семейство характеристик (данные RTC, фототранзистор BPW 22).

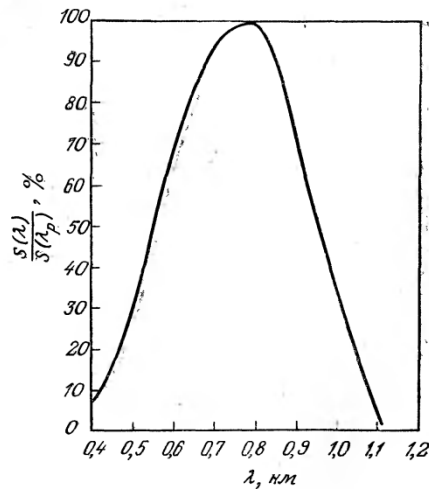


Рис. 5.38. Кривая спектральной чувствительности (данные RTC, фототранзистор BPW 22).

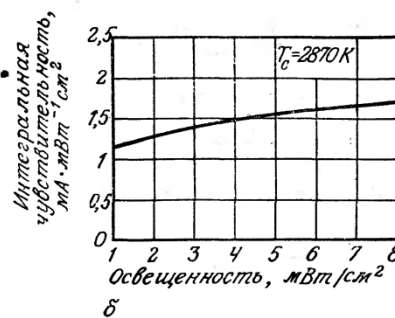
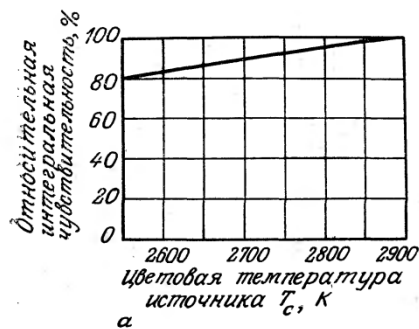


Рис. 5.39. Интегральная чувствительность транзистора (данные Motorola, транзистор MRD 300).

а — зависимость от цветовой температуры источника; б — зависимость от освещенности.

5.9.4. Быстродействие

Различные временные характеристики могут быть рассчитаны, если представить фототранзистор его эквивалентной схемой Джаколетто, соединенной с нагрузкой R_m . Численные параметры элементов, составляющих схему Джаколетто, зависят от рабочей точки. Кроме того:

а) время запаздывания t_{dm} , времена нарастания t_m и спада t_c выходного сигнала уменьшаются, когда ток коллектора в рабочей точке возрастает (рис. 5.40);

б) времена нарастания t_m и спада t_c увеличиваются при возрастании нагрузки R_m ; то же относится и ко времени запаздывания t_{dm} , если сопротивление больше килоома.

5.9.5. Частотная характеристика

При нагрузке на сопротивление R_m эффект Миллера,

связанный с емкостью $C_{b'e}$, приводит к параллельному подключению к $r_{b'e}$ и $C_{b'e}$ емкости, равной $C_{b'c}(1+g_m R_m)$. Граничная частота на входе, которая и является практически граничной частотой фототранзистора, в этом случае определяется выражением

$$f_c = \frac{g_{b'e}}{2\pi\{C_{b'e} + C_{b'c}(1 + g_m R_m)\}}.$$

Величина f_c зависит от нагрузки R_m и рабочей точки; значение f_c лежит обычно между несколькими десятками и несколькими сотнями килогерц.

5.9.6. Шумы

В отношении мощности, эквивалентной шуму, и обнаружительной способности фототранзистор не имеет никаких преимуществ перед диодом. Схематично это можно объяснить тем, что как сигнал, так и шум, возникающие в эквивалентном фотодиоде на p — n -переходе база — коллектор, усиливаются одинаково.

5.9.7. Схемы включения фототранзисторов

Фототранзистор может использоваться либо как коммутатор, либо в линейном режиме. В коммутационном режиме его преимущество перед фотодиодом заключается в том, что можно непосредственно управлять относительно большими токами. В линейном режиме, напротив (хотя у фототранзистора и есть определенные преимущества, связанные с присущим ему усилением), фотодиод обеспечивает лучшую линейность и, следовательно, меньшие искажения.

Фототранзистор в режиме коммутации. Информация в этом случае носит дискретный характер: присутствует ли излучение, или, точнее, превосходит ли освещенность определенный порог. Фототранзистор блокирует или пропускает (в режиме насыщения) ток, управляя непосредственно или после усиления работой реле, логической вентильной схемой или тиристором (рис. 5.41).

Быстродействие коммутации ограничивается сопротивлением нагрузки фототранзистора и может быть значительно улучшено, если далее следует схема с малым входным импедансом — схема с общей базой (рис. 5.42, а) или преобразователь ток — напряжение (рис. 5.42, б).

Фототранзистор в линейном режиме. Такой транзистор находит применение:

а) для измерения постоянной освещенности, когда на базе фототранзистора можно построить простой люксметр (рис. 5.43, а);

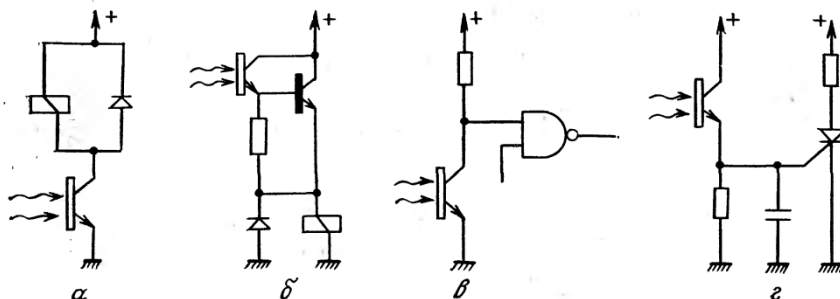


Рис. 5.41. Примеры использования фототранзисторов в схемах управления. а — реле; б — реле после усиления; в — логической вентильной схемой; г — тиристором.

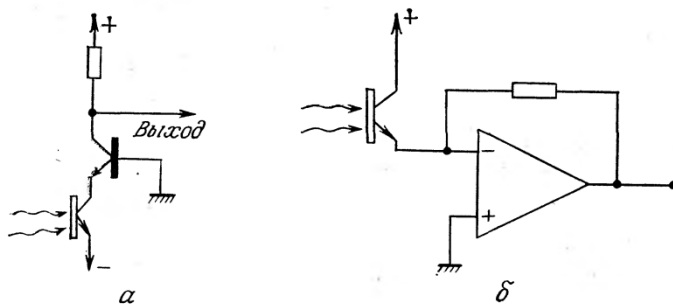


Рис. 5.42. Схемы, позволяющие повысить скорость коммутации.
 а — каскад с общей базой; б — преобразователь ток — напряжение.

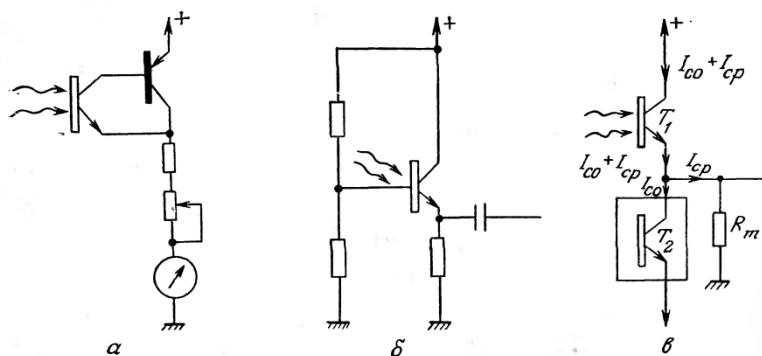


Рис. 5.43. Фототранзистор в линейном режиме.
 а — схема люксметра; б — выбор рабочей точки путем подачи смещения на базу (когда база доступна для подключения к ней напряжения); в — компенсация темного тока в нагрузке.

б) для приема модулированных сигналов в виде

$$\Phi(t) = \Phi_0 + \Phi_1(t).$$

Амплитуда модулированной составляющей $\Phi_1(t)$ должна быть достаточно малой во избежание перехода фототранзистора в режим насыщения или запирающего и для того, чтобы чувствительность можно было рассматривать как константу.

При этом ток коллектора фототранзистора определяется выражением

$$i_c(t) = I_c(\Phi_0) + S\Phi_1(t).$$

Фототранзистор с базой, к которой можно электрически подключиться (рис. 5.43, б), имеет то преимущество, что, фиксируя смещение базы, можно выбрать рабочую точку, обеспечивающую оптимальную линейность.

Расширение полосы пропускания и уменьшение времени коммутации можно обеспечить, уменьшая нагрузку фототранзистора; в дальнейшем применяется либо схема с общей базой, либо преобразователь ток — напряжение (рис. 5.42).

Темновой ток фототранзистора T_1 можно в нагрузке устранить, подключая дифференциально второй такой же фототранзистор T_2 при той же температуре со своим темновым током. Темновой ток через нагрузку в этом случае не течет (рис. 5.43, в).