

1. Оцените емкость МДП-структуры в режиме обеднения при подаче на затвор импульса напряжения амплитудой 20 В при концентрации донорной примеси 10^{16} см $^{-3}$ и толщине диэлектрика 0,5 мкм.

2. Запишите уравнение, описывающее выходную ВАХ МДП-транзистора в активной области работы (на холстом участке ВАХ), с учетом влияния модуляции длины канала и напряжения подложки.

3. Перечислите основные параметры МДП-транзистора для усилительного и ключевого режимов эксплуатации, приведите ориентировочные значения параметров для интегральных и мощных МДП-транзисторов.

4. Изобразите диаграммы зависимости тока стока и напряжения стока МДП-транзистора в ключевом режиме эксплуатации для двух значений емкости затвора; то же для двух значений сопротивления нагрузочного резистора.

5. Определите особенности работы в ключевом режиме комплементарной пары МДП-транзисторов во сравнении с одночным МДП-транзистором.

6. Оцените значение остаточного напряжения и длительности положительного и отрицательного фронтов МДП-транзистора в ключевом режиме при амплитуде напряжения затвора 5 В, $E_0=30$ В, $R_0=30$ Ом, $C_{in}=2000$ пФ, $S=1$ А/В, $U_{нар}=1$ В; то же с учетом эффекта Миллера.

7. Определите основные особенности структуры и построения цепи управления мощных МДП-транзисторов.

8. Сравните основные параметры и характеристики СНТ с МДП-транзисторами с точки зрения эксплуатации этих приборов в усилительном и ключевом режимах.

9. Оцените время вывода информации из ПЗС в периодах тактовой частоты, если информационный зарядовый пакет находился под n -м затвором.

с длиной волны λ от 10 нм до 1 мм 1 . По физическим свойствам оптический диапазон волн неоднороден. Поэтому принято оптический диапазон делить на поддиапазоны, в которых физические свойства в определенной степени одинаковы: ультрафиолетовое излучение ($\lambda=0,01 \div 0,4$ мкм), видимое излучение ($\lambda=0,38 \div 0,78$ мкм), инфракрасное излучение ($\lambda=0,78 \div 1$ мм) (рис. 5.1).

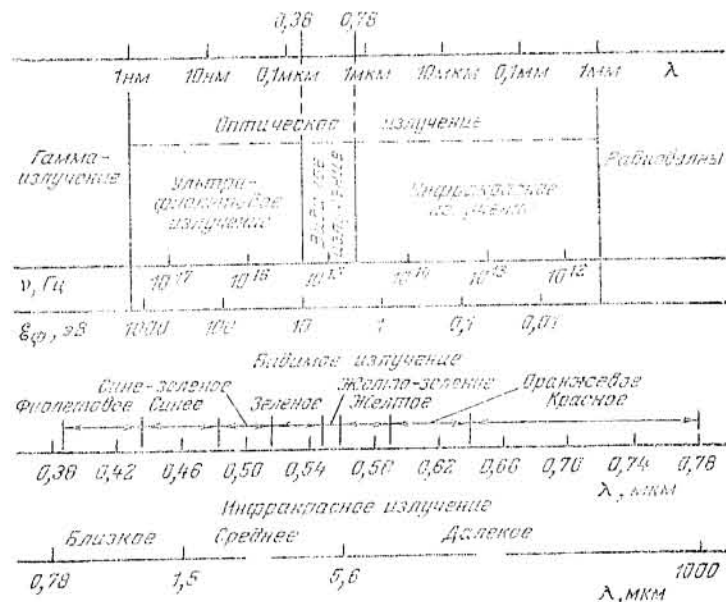


Рис. 5.1. Шкала электромагнитных волн: ν — частота излучения; $E_{ф}$ — энергия излучения

Оптическое излучение характеризуют фотометрическими параметрами. Различают фотометрические параметры энергетические и световые.

Энергетические параметры характеризуют излучение безотносительно к его действию на какой-либо приемник излучения и связаны с переносимой излучением энергией.

С помощью световых параметров оценивают излучение

$^1 1 \text{ мм} = 10^3 \text{ мкм} = 10^6 \text{ нм}$.

Глава пятая

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

5.1. ОПТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

5.1.1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И СВЕТОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Принципиальная особенность оптоэлектронных приборов состоит в использовании оптического излучения.

Оптическое излучение — это электромагнитные волны

в случае, если приемником излучения служит человеческий глаз. Чувствительность глаза к свету с разными длинами волны неодинакова. Она имеет максимум при $\lambda = 0,555$ мкм и быстро снижается при удалении от этого максимума. На границах видимого диапазона ($\lambda = 0,38$ и $0,78$ мкм) чувствительность глаза практически падает до нуля.

На рис. 5.2 показана относительная спектральная световая эффективность глаза, адаптированного на дневной (1) и ночной (2) свет. Относительная спектральная световая

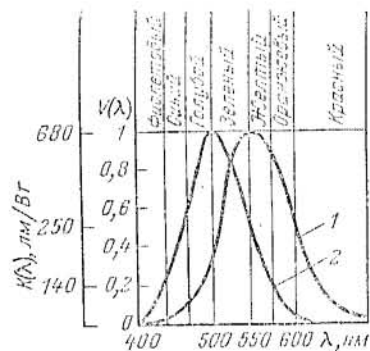


Рис. 5.2. Спектральная характеристика чувствительности человеческого глаза

эффективность $V(\lambda)$ представляет собой результат усреднения многих исследований. Оптическое излучение в видимом диапазоне описывается световыми параметрами и характеристиками.

Таким образом, энергетические и световые параметры излучения по смыслу одинаковы, но характеризуют излучение в различных диапазонах волны и имеют различные единицы измерения. Количественные характеристики излучения света связывают со зрительным ощущением; в инфракрасном и ультрафиолетовом поддиапазонах оптического излучения, не воспринимаемого глазом, параметры характеризуют непосредственно энергию, переносимую излучением. Световые и энергетические параметры связаны пропорциональной зависимостью.

Для количественного описания оптического излучения, а также источников и приемников излучения используются пять основных энергетических параметров: поток излучения и сила излучения — параметры, характеризующие излучение; энергетическая светимость и энергетическая яркость —

эти параметры характеризуют источник излучения с учетом площади излучаемой поверхности; энергетическая освещенность (облученность) — этим параметром характеризуют облучаемую, т. е. принимающую излучение, поверхность. Для видимого излучения применяются, соответственно пять световых параметров: световой поток, сила света, светимость, яркость и освещенность.

Параметры оптического излучения, расчетные формулы, единицы величин и обозначения сведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1. Фотометрические параметры излучения

Параметр	Энергетические параметры		Световые параметры		Формула (см. рис. 5.3)	
	Обозначение	Единица измерения	Параметр	Единица измерения		
Поток излучения	Φ_e	Вт	Световой поток	Φ_v	лм	$\Phi = dW/dt$, где W — энергия излучения
Сила излучения	I_e	Вт/ср	Сила света	\mathcal{J}_v	кд-лм/ср	$I = d\Phi/d\Omega$, где Ω — телесный угол
Энергетическая светимость	M_e	Вт/м ²	Светимость	M_v	лм/м ²	$M = d\Phi/dS$
Энергетическая яркость	L_e	Вт/(ср × м ²)	Яркость	L_v	кд/м ²	$L = \frac{dI}{dS \cos \theta}$
Энергетическая освещенность (облученность)	E_e	Вт/м ²	Освещенность	E_v	лк-лм/м ²	$E = d\Phi/dS$

В ряде случаев эксплуатации излучателей требуется перевод имеющихся световых параметров в энергетические и наоборот. Так, в паспортных данных на светозлучающие диоды излучение характеризуется обычно силой света или яркостью. Применение же этих приборов, например, в устройствах оптической связи и сигнализации не позволяет непосредственно использовать световые параметры. Переход к энергетическим параметрам осуществляется с помощью световой эффективности, которая в общем случае равна:

$$K = \frac{\Phi_v [\text{лм}]}{\Phi_e [\text{Вт}]} = \frac{\mathcal{J}_v [\text{кд}]}{\mathcal{J}_e [\text{Вт/ср}]} = \frac{L_v [\text{кд/м}^2]}{L_e [\text{Вт/(ср} \cdot \text{м}^2)]} \quad (5.1)$$

зано прежде всего с ростом падения напряжения на объемном сопротивлении базы фотодиода r_B (см. рис. 5.42, б). Снижение фото-ЭДС U_x объясняется уменьшением высоты потенциального барьера при накоплении избыточного заряда электронов в n -области и дырок в p -области: как следствие этого процесса, поле p - n перехода хуже разделяет фотоносители и рост фото-ЭДС при увеличении потока излучения замедляется.

Спектральная характеристика. Из (5.43), воспользовавшись известным соотношением $\nu = c_0/\lambda$, можно получить зависимость чувствительности S_Φ от длины волны λ , т. е. спектральную характеристику

$$S_\Phi = I_\Phi / \Phi = q \eta \gamma_B / h \nu c_0 \quad (5.44)$$

где c_0 — скорость света.

Из (5.44) следует, что спектральная характеристика, во-первых, линейна, во-вторых, проходит через начало координат (см. рис. 5.39).

Реальная спектральная характеристика, изображенная на рис. 5.39 пунктиром, отклоняется от выражения

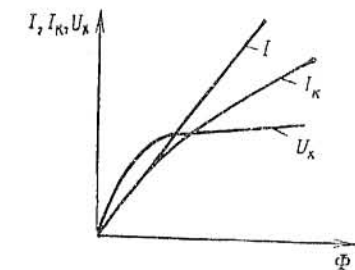


Рис. 5.46. Световые характеристики фотодиода в фотодиодном и фотогальваническом режимах (I_k и U_x)

(5.40). Снижение чувствительности в области коротких волн связано с тем, что при уменьшении длины волны энергия излучения поглощается в тонком приповерхностном слое, где скорость рекомбинации за счет ловушек значительно больше, чем в глубине материала. Таким образом, коротковолновая граница чувствительности фотодиода зависит от толщины базы и от скорости поверхностной рекомбинации. Уменьшая толщину базы и скорость рекомбинации, можно сдвигать коротковолновую границу чувствительности фотодиода в сторону уменьшения длины волны. Спад чувствительности в области длинных волн соответствует длинноволновой границе спектральной чувствительности материала.

Положение максимума на спектральной характеристике фотодиода сильно зависит от спектральной характеристики коэффициента поглощения материала фотодиода. Если глубина поглощения χ_0 резко уменьшается с уменьшением дли-

ны волны падающего света, как, например, в германии (см. рис. 5.37), то положение максимума определяется шириной запрещенной зоны ($\lambda_{max} = 1,55$ мкм для Ge) и от толщины базы практически не зависит. Если же зависимость глубины поглощения χ_0 от длины волны слабая, как, например, в кремнии, то максимум спектральной характеристики может смещаться при изменении толщины базы и скорости поверхностной рекомбинации. Так, максимум спектральной характеристики кремниевого фотодиода можно изменять в диапазоне λ_{max} от 0,6 до 1 мкм.

Быстродействие фотодиода. Быстродействие фотодиода определяется, с одной стороны, процессами разделения носителей, возникающих при поглощении излучения, полем p - n перехода, с другой стороны — емкостью p - n перехода. Разделение фотоносителей полем p - n перехода происходит после того, как соответствующий фотоноситель (дырка или электрон) из места возникновения (генерации) продиффундирует к p - n переходу. Время пролета носителей через p - n переход

$$t_{пр} \approx \delta / v_{max}$$

где δ — ширина p - n перехода (см. рис. 5.40); v_{max} — максимальная скорость дрейфа носителей заряда.

В германии и кремнии $v_{max} \approx 5 \cdot 10^4$ м/с. Ширина p - n перехода, которая зависит от обратного напряжения и концентрации примесей в базе, обычно меньше 5 мкм. Следовательно, время пролета носителей через p - n переход $t_{пр} \leq \leq 0,1$ нс.

Длительность перезаряда барьерной емкости фотодиода при малом сопротивлении нагрузки определяется постоянной времени $C_{бар} r_B$, где r_B — сопротивление базы диода. Значение постоянной времени $C_{бар} r_B$ для обычных фотодиодов составляет около 1 нс.

Как показывают расчеты, быстродействие фотодиодов определяется в основном длительностью диффузии фотоносителей к p - n переходу (см. рис. 5.40). Учтя этот факт, рассмотрим переходные процессы в фотодиодном режиме.

Чтобы найти закон изменения фототока во времени, необходимо решить одномерное нестационарное уравнение диффузии для дырок в n -области:

$$D_p \partial^2 (\Delta p) / \partial x^2 - \Delta p / \tau_p = \partial (\Delta p) / \partial t, \quad (5.45)$$

где $\Delta p = p - p_{n0}$ — неравновесная концентрация дырок в n -базе; τ_p — время жизни дырок в n -базе; D_p — коэффициент диффузии дырок.

Будем считать, что в момент $t=0$ концентрация избыточных дырок во всей n -области $\Delta p=0$. При освещении n -области в тонком приповерхностном слое на расстоянии w от p - n перехода возникают неравновесные дырки. Ток, созданный этими дырками, определяется выражением (5.43). Поэтому граничное условие при $x=0$ можно записать в виде

$$\left. \frac{\partial(\Delta p)}{\partial x} \right|_{x=0} = -\frac{I_{\Phi}}{qD_p}. \quad (5.46a)$$

К фотодиоду приложено обратное напряжение, поэтому второе граничное условие при $x=w$ запишется следующим образом:

$$\Delta p|_{x=w} = 0. \quad (5.46b)$$

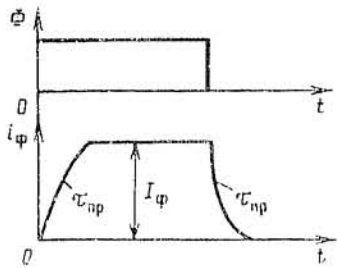


Рис. 5.47. Переключение фотодиода в фотодиодном режиме

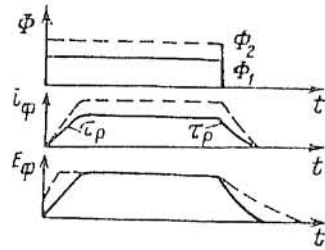


Рис. 5.48. Переключение фотодиода в фотогальваническом режиме

Решение уравнения диффузии при заданных граничных условиях имеет вид

$$i_{\Phi} = I_{\Phi} (1 - e^{-t/\tau_{np}}), \quad (5.47)$$

где $\tau_{np} = w^2 / (2D_p)$ — время пролета неосновных носителей в n -базе.

При выключении излучения процесс исчезновения неосновных носителей определяется уходом через p - n переход и ток спадает по закону

$$i_{\Phi} = I_{\Phi} e^{-t/\tau_{np}}. \quad (5.48)$$

Диаграммы изменения фототока в фотодиодном режиме приведены на рис. 5.47.

Рассмотрим переходные процессы в фотогальваническом режиме и определим характер изменения фото-ЭДС при разомкнутой внешней цепи.

Пусть в момент $t=0$ (рис. 5.48) на фотодиод подан прямоугольный световой импульс. В n -области прибора начинается генерация неравновесных носителей, концентрация которых будет увеличиваться во времени. Соответственно будет увеличиваться дырочный ток через p - n переход и p -область днада будет заряжаться положительно по отношению к n -области. С ростом концентрации избыточных носителей будет увеличиваться скорость их рекомбинации. При некотором значении концентрации рекомбинация носителей и генерация носителей будут уравниваться друг друга, а фото-ЭДС достигнет установившегося значения. После окончания светового импульса избыточные носители в n -области рекомбинируют, концентрация их уменьшается и уменьшается ток I_{Φ} через p - n переход. Будет уменьшаться и фото-ЭДС. Таким образом, процесс изменения фото-ЭДС и фототока в фотогальваническом режиме определяется генерацией и рекомбинацией (накоплением и рассасыванием) избыточных носителей, скорость которых характеризуется постоянной времени жизни τ_p , т. е. нарастание фототока происходит по закону

$$i_{\Phi} = I_{\Phi} (1 - e^{-t/\tau_p}), \quad (5.49)$$

а спад

$$i_{\Phi} = I_{\Phi} e^{-t/\tau_p}, \quad (5.50)$$

что иллюстрируется рис. 5.48.

Закон нарастания и спада фото-ЭДС можно получить из (5.40) подстановкой выражений (5.49) и (5.50):

$$\left. \begin{aligned} E_{\Phi} &= \varphi_T \ln \left[\frac{I_{\Phi}}{I_0} (1 - e^{-t/\tau_p}) + 1 \right]; \\ E_{\Phi} &= \varphi_T \ln \left[\frac{I_{\Phi}}{I_0} e^{-t/\tau_p} + 1 \right]. \end{aligned} \right\} \quad (5.51)$$

На рис. 5.48 приведены кривые, построенные по формулам (5.51) для разных интенсивностей освещения; видно, что с увеличением потока излучения Φ уменьшается время нарастания и увеличивается время спада фото-ЭДС.

В фотодиодном режиме параметр τ_{np} определяет время диффузии носителей от зоны их генерации до p - n перехода. Для уменьшения τ_{np} можно уменьшить w (см. рис. 5.40).

Для кремния $D_p = 0,01 \text{ м}^2/\text{с}$; $\omega = 10 \text{ мкм}$, т. е. $\tau_{др} \approx 100 \text{ нс}$. Дальнейшее уменьшение ω нецелесообразно, так как снижается чувствительность фотодиода, а максимум чувствительности сдвигается в коротковолновую область, что затрудняет согласование фотодиода с излучателем. Повышение быстродействия фотодиода при сохранении высокой чувствительности стало возможным при переходе к более сложным полупроводниковым структурам.

5.4.5. РАЗНОВИДНОСТИ ФОТОДИОДОВ

Фотодиоды с $p-i-n$ структурой. Расширение частотного диапазона фотодиода без снижения его чувствительности возможно в $p-i-n$ структурах (рис. 5.49).

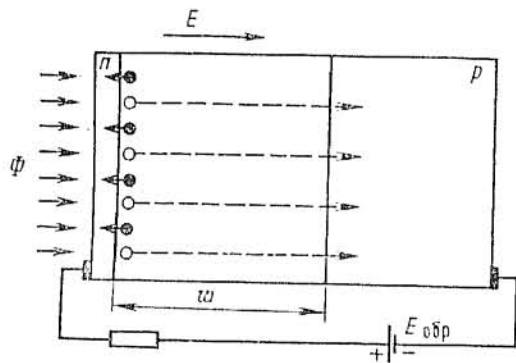


Рис. 5.49. Фотодиод с $p-i-n$ структурой

В $p-i-n$ структуре i -область заключена между двумя областями противоположного типа электропроводности и имеет удельное сопротивление, в 10^6 — 10^7 раз большее, чем сопротивление легированных областей n - и p -типов. При достаточно больших обратных напряжениях сильное и почти однородное электрическое поле напряженностью E распространяется на всю i -область. Поскольку эта область может быть сделана достаточно широкой, такая структура создает основу для получения быстродействующего и чувствительного приемника. Дырки и электроны, появившиеся в i -области за счет поглощения излучения, быстро разделяются электрическим полем. Энергетическая диаграмма $p-i-n$ диода при обратном смещении представлена на рис.

5.50. Около 90 % излучения поглощается непосредственно в i -области.

Повышение быстродействия обусловлено тем, что процесс диффузии через базу, характерный для обычной структуры, в $p-i-n$ структуре заменяется дрейфом носителей через i -область в сильном электрическом поле (см. рис. 5.41 и 5.50). Время дрейфа дырок $t_{др}$ через i -область шириной ω составляет

$$t_{др} = \omega/v_p = \omega/\mu_p E, \quad (5.52)$$

где E — напряженность электрического поля в i -области; μ_p — подвижность дырок; $v_p = \mu_p E$ — скорость дрейфа дырок в электрическом поле.

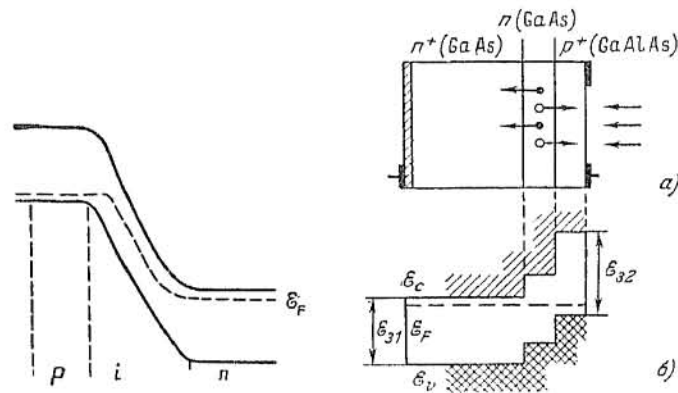


Рис. 5.50. Энергетическая диаграмма фотодиода с $p-i-n$ структурой

Рис. 5.51. Фотодиод с гетероструктурой:
а — структура; б — энергетическая диаграмма

При напряженности электрического поля примерно $2 \cdot 10^6 \text{ В/м}$ достигается максимальная скорость дрейфа носителей $v = (6 \div 8) \cdot 10^4 \text{ м/с}$.

В этом случае при $\omega = 10^{-2} \text{ см}$ получим $t_{др} \approx 10^{-9} \div 10^{-10} \text{ с}$. Диапазон частот для этого диода $\Delta f \approx 10^9 \text{ Гц}$. Это быстродействующие кремниевые фотодиоды.

Отношение времени дрейфа носителей через i -область в $p-i-n$ фотодиоде к времени диффузии через базу в $p-n$ фотодиоде можно представить в виде

$$\frac{t_{др}}{t_{диф}} \approx \frac{\omega/\mu_p E}{\omega^2/2D_p} = \frac{\omega^2/\mu_p U_{обр}}{\omega^2/2D_p} = \frac{2\varphi_T}{U_{обр}}, \quad (5.53)$$

так как $D_p/\mu_p = kT/q = \varphi_T$.

Следовательно, уже начиная с $U_{обр} = 0,1 \div 0,2$ В $p-i-n$ фотодиоды имеют преимущество в быстродействии.

Таким образом, фотодиоды с $p-i-n$ структурой имеют следующие основные достоинства.

1. Сочетание высокой чувствительности (на длине волны $\lambda \approx 0,9$ мкм практически достигнут теоретический предел чувствительности $S_{\phi} \approx 0,7$ А/Вт) и высокого быстродействия.

2. Возможность обеспечения высокой чувствительности в длинноволновой области спектра при увеличении ширины i -области.

3. Малая барьерная емкость.

4. Малые рабочие напряжения в фотодиодном режиме, что обеспечивает электрическую совместимость $p-i-n$ фотодиодов с интегральными микросхемами.

К недостаткам $p-i-n$ структуры следует отнести требование высокой чистоты i -базы и плохую технологическую совместимость с тонкими легированными слоями интегральных схем.

Фотодиоды Шоттки. Фотодиоды со структурой металл — полупроводник (фотодиоды Шоттки) также позволяют повысить быстродействие до 10^{-10} с и выше.

С точки зрения применения контакта металл — полупроводник в фотодиодах следует подчеркнуть такие основные особенности. Во-первых, в фотодиоде с барьером Шоттки появляется возможность поглощения квантов излучения с энергией, меньшей ширины запрещенной зоны, в металле контакта. При этом, если энергия кванта излучения больше высоты потенциального барьера, возбужденные электроны из металла могут перейти в полупроводник через потенциальный барьер. В результате длинноволновая граница спектральной характеристики фотодиода Шоттки сдвигается в сторону более длинных волн.

Во-вторых, в фотодиоде Шоттки с ростом энергии квантов область поглощения излучения сдвигается в слой объемного заряда, где существует поле, разделяющее фотоносители. В фотодиоде с $p-n$ переходом при малой глубине поглощения фототок практически равен нулю. Следовательно, коротковолновая граница спектральной характеристики фотодиода Шоттки расположена при более коротких волнах. Вообще спектральная характеристика фотодиода на основе контакта металл — полупроводник значительно шире, чем спектральная характеристика фотодиода с $p-n$ переходом из того же полупроводника.

Фотодиоды Шоттки характеризуются рядом других примечательных достоинств, важных с точки зрения применения приборов в оптоэлектронике:

1) малым сопротивлением базы фотодиода. Поэтому постоянная времени барьерной емкости $C_{бар} r_{Б}$ у фотодиодов Шоттки порядка 10^{-12} с и инерционность этих приборов определяется только временем пролета фотоносителей через область объемного заряда и составляет $10^{-10} - 10^{-11}$ с;

2) сочетанием высокого быстродействия и высокой чувствительности ($S_{\phi} = 0,5$ А/Вт);

3) простотой создания выпрямляющих фоточувствительных структур на самых разнообразных полупроводниках (в том числе и на таких, в которых не удается создать $p-n$ переход) и, как следствие этого, возможностью управления высотой потенциального барьера Шоттки.

Фотодиоды с гетероструктурой. Фотодиоды с гетероструктурой представляют собой один из наиболее перспективных типов оптоэлектронных фотоприемников. В сущности, гетероструктура открывает принципиальную возможность получения фотодиода с КПД, близким к 100%. Устройство и зонная диаграмма гетерофотодиода изображены на рис. 5.52. Слой GaAlAs играет роль окна, пропускающего излучение, поглощаемое в средней n -области (GaAs). Разницы в ширине запрещенных зон по обе стороны от гетероперехода около 0,4 эВ. Генерируемые в n -области под воздействием оптического излучения дырки беспрепятственно переносятся в p^+ -область. Ширина активной n -области выбирается такой, чтобы обеспечить поглощение всего излучения. Высокая степень чистоты активной области, низкая плотность поверхностных состояний границ между слоями обеспечивают малые рекомбинационные потери фотоносителей.

Таким образом, при исключительно высоком КПД гетерофотодиоды сохраняют достоинства рассмотренных выше структур: сочетание высокой чувствительности с высоким быстродействием, малые рабочие напряжения.

Гетероструктура позволяет, выбрав подходящие пары полупроводников для фотодиодов, работать практически в любой части оптического диапазона длин волн. Это преимущество обусловлено тем, что в гетероструктуре рабочая длина волны определяется разницей ширины запрещенных зон и не связана со спектральной характеристикой глубины поглощения χ_0 . Вследствие хороших возможностей выбора материала базы достижимое значение фото-ЭДС у гетерофотодиодов составляет 0,8—1,1 В (в 2—3 раза выше, чем у кремниевых фотодиодов). Основным недостатком гетерофотодиодов является присущая вообще гетероструктурам сложность изготовления.

Лавинные фотодиоды. Одним из путей создания быстродействующих фотоприемников с высокой чувствительностью является использование лавинного пробоя, в частности создание лавинных фотодиодов. Если поле в активной зоне фотодиода велико и энергия, приобретаемая фотоносителями тока (электронами и дырками) в этом поле превышает энер-

нию образования электронно-дырочных пар, то начинается лавинообразный процесс размножения носителей. Процесс размножения начинается с генерации носителей под действием излучения, т. е. имеем фотодиод с лавинным размножением носителей.

Усиление первичного фототока в лавинном фотодиоде определяется коэффициентом лавинного размножения:

$$M = I_{\Phi} / I_{\Phi_0}, \quad (5.54)$$

где I_{Φ} — ток на выходе фотодиода с учетом размножения; I_{Φ_0} — ток при отсутствии размножения.

Таким образом, коэффициент лавинного размножения в лавинном фотодиоде является коэффициентом усиления фототока.

Известно, что коэффициент размножения зависит от напряжения на переходе:

$$M = 1 / [1 - (U / U_{\text{проб}})^m], \quad (5.55)$$

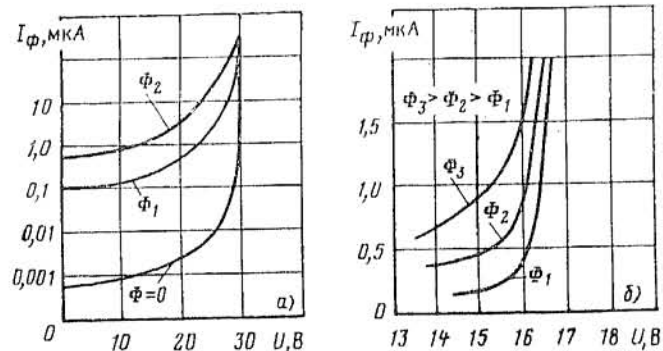


Рис. 5.52. Вольт-амперные характеристики лавинных фотодиодов

где $U_{\text{проб}}$ — пробивное напряжение; U — напряжение на $p-n$ переходе; $m=1,5 \div 2$ для кремния p -типа; $m=3,4 \div 4$ для кремния n -типа.

Тогда ВАХ лавинного фотодиода можно представить в виде

$$I_{\Phi} = I_{\Phi_0} / [1 - (U / U_{\text{проб}})^m]. \quad (5.56)$$

На рис. 5.53 представлены типичные для лавинных фотодиодов ВАХ.

Лавинные фотодиоды перспективны при обнаружении слабых оптических сигналов. Более широкое применение лавинных фотодиодов связано со значительными трудностями. Прежде всего, эти трудности определяются тем, что в предпробойном режиме коэффициент усиления фототока M резко зависит от напряжения. В самом деле, из (5.55)

можно получить выражение для расчета относительного изменения коэффициента усиления фототока при изменении напряжения на переходе:

$$\frac{dM}{M} = \frac{mM}{U} dU \left(\frac{U}{U_{\text{проб}}} \right)^m \approx mM \frac{dU}{U}. \quad (5.57)$$

Очевидно, что нормальная работа фотодиода возможна только при достаточно стабильном выходном токе I_{Φ} , т. е. при стабильном значении коэффициента усиления M . Пусть мы хотим иметь относительные изменения коэффициента усиления не больше 10% ($dM/M=0,1$). Тогда для кремниевого фотодиода ($m=3,5$; $M=300$) получим $dU/U=0,0001=0,01\%$, т. е. для надежной работы лавинного фотодиода необходима очень высокая стабилизация питающего напряжения. Следует также подчеркнуть, что типичные значения $U_{\text{проб}}=30 \div 100$ В. Это приводит к большим потерям энергии $U_{\text{проб}} I_{\Phi}$ в фотодиоде. Развитие пробоя происходит не одновременно по всей площади $p-n$ перехода, а в отдельных «микроплазмах». Это вызывает дополнительную нестабильность M и увеличивает шумы. Перечисленные недостатки в сочетании с разбросом параметров у отдельных образцов ограничивают применение лавинных фотодиодов.

5.4.6. ФОТОПРИЕМНИКИ С ВНУТРЕННИМ УСИЛЕНИЕМ

В фотоприемниках с внутренним усилением кроме преобразования оптического излучения в электрический ток (фототок) имеет место еще и увеличение (усиление) фототока. Основными разновидностями фотоприемников с внутренним усилением, применяемых в настоящее время в оптоэлектронике, являются фототранзистор, составной фототранзистор и фототиристор¹.

Через фотоприемное окно оптическое излучение попадает в рабочую область структуры. В этой области обеспечивается генерация фотоносителей, которые затем разделяются $p-n$ переходом. Разделение фотоносителей сопровождается дополнительным увеличением их концентрации за счет механизма электрического усиления.

На рис. 5.53 представлены типичные структуры фотоприемников с внутренним усилением.

Фототранзистор. Фототранзистор в электрическую цепь включается обычно по схеме с общим эмиттером. База фототранзистора может не иметь внешнего вывода.

Рассмотрим работу фототранзистора в схеме (рис. 5.54, а).

¹ К фотоприемникам с внутренним усилением относятся, вообще говоря, и рассмотренные в § 5.4.5 лавинные фотодиоды.

Под действием излучения начинается генерация носителей в базе, которые затем разделяются коллекторным переходом. Дырки уходят через коллекторный переход в коллектор, а электроны остаются в базе. Для того чтобы восстановить нейтральность заряда в базе транзистора при

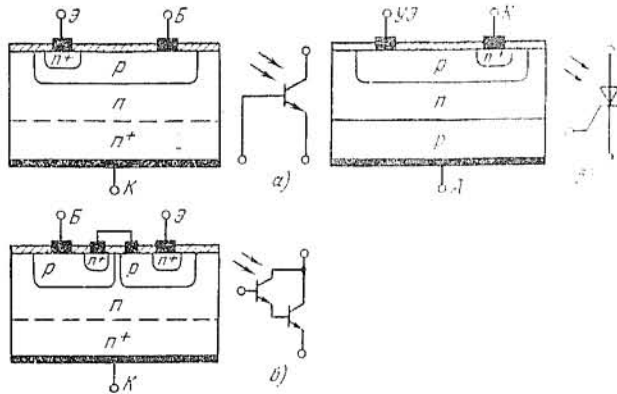


Рис. 5.53. Структуры фотоприемников с внутренним усилением: а — фототранзистор; б — составной фототранзистор; в — фототриод

тока в β раз больше, а интегральная чувствительность фототранзистора по сравнению с фотодиодом увеличивается:

$$S_{\Phi} = S_{\Phi d} \beta,$$

где $S_{\Phi d}$ — токовая чувствительность фотодиода, образованного эмиттерным переходом транзистора; β — коэффициент передачи тока базы транзистора.

Повышение чувствительности — главное преимущество фототранзистора по сравнению с фотодиодом. Однако это преимущество обычно достигается за счет снижения температурной стабильности прибора, так как фототранзистор работает при постоянном токе базы.

Вообще говоря, у фототранзисторов снижается также пороговая чувствительность, так как значительно возрастает темновой ток:

$$I_{\tau} = I_{K0} (1 + \beta), \quad (5.58)$$

где I_{K0} — тепловой ток транзистора.

Применение фототранзисторов и улучшение параметров этих приборов затрудняет, в частности, следующее обстоятельство: высокий коэффициент передачи и малое время переключения требуют уменьшения толщины базовой области, что обычно приводит к снижению фоточувствительности прибора. Компромисс определяет относительно низкое быстродействие фототранзисторов ($t_{пер} \approx 10^{-6} \div 10^{-7}$ с).

Повышение быстродействия возможно в интегральных фотоприемниках с внутренним усилением, которые представляют собой соединенные фотодиод и транзистора (рис. 5.55). Раздельная оптимизация позволяет получить чувствительный, быстродействующий фотодиод и высокочастотный транзистор в единой структуре (рис. 5.55). Такая структура эквивалентна быстродействующему фототранзистору с большим внутренним усилением по току.

Составной фототранзистор. Применение составного фототранзистора (см. рис. 5.54) позволяет еще больше увеличить чувствительность, так как коэффициент передачи тока β составного транзистора значительно больше, чем у обоих его компонентов. Связь между токами в составном транзисторе (рис. 5.56) имеет вид

$$I_K = I_{K1} + I_{K2} = \beta_1 I_{B1} + \beta_2 I_{B2} = \beta_1 I_{B1} + \beta_2 (1 + \beta_1) I_{B1}. \quad (5.59)$$

Коэффициент передачи тока

$$\beta = I_K / I_{B1} = \beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \beta_2 \approx \beta_1 \beta_2. \quad (5.60)$$

$I_{\tau} = 0$, эмиттер инжектирует дополнительное количество положительных носителей заряда — дырок. Фототок в данном случае играет роль тока базы. Соответственно выходные характеристики фототранзистора аналогичны характеристикам биполярного транзистора (рис. 5.54, б), т. е. по сравнению с обычным фотодиодом фототранзистор дает усиление

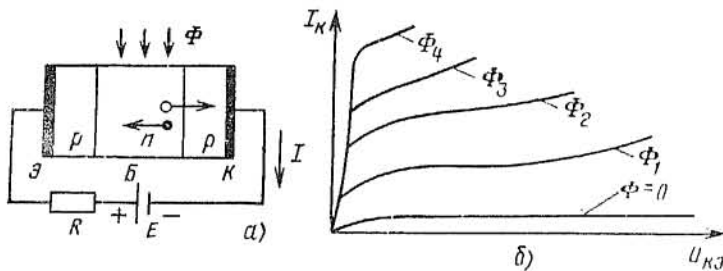


Рис. 5.54. Фототранзистор: а — принцип работы; б — выходные ВАХ

В результате чувствительность составных фототранзисторов повышается обычно более чем в 1000 раз по сравнению с чувствительностью фотодиодов.

Фототиристор. Рассмотрим четырехслойную $p-n-p-n$ структуру фототиристора (рис. 5.57, а). Структура освещается равномерно по всей площади, которая расположена параллельно плоскостям $p-n$ переходов. К структуре приложено прямое напряжение (положительный полюс к аноду, отрицательный к катоду). В статическом режиме (при про-

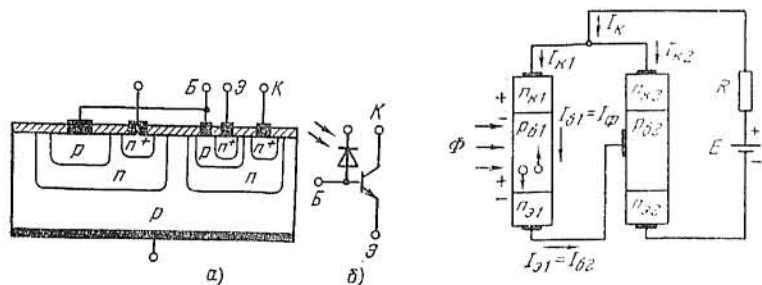


Рис. 5.55. Структура фотодиода-транзистора

Рис. 5.56. Токи в составном фототранзисторе

текании постоянного тока) по закону непрерывности тока можно записать для тока через центральный переход $P2$:

$$I_{P2} = (I_{K0} + I_{\Phi 2}) + (1 + I_{\Phi 1}) \alpha_1 + (1 + I_{\Phi 3}) \alpha_2, \quad (5.61a)$$

откуда получим

$$I(1 - \alpha_1 - \alpha_2) = I_{K0} + I_{\Phi 1} \alpha_1 + I_{\Phi 2} + I_{\Phi 3} \alpha_2, \quad (5.61б)$$

где $I_{\Phi 1} - I_{\Phi 3}$ — фототоки, возникающие вследствие разделения соответствующими $p-n$ переходами генерированных излучением носителей; α_1, α_2 — коэффициенты передачи по току $p_1-n_1-p_2$ и $p_2-p_2-n_1$ транзисторов.

При отсутствии освещения, т. е. при $I_{\Phi 1} = I_{\Phi 2} = I_{\Phi 3} = 0$, получим выражение для ВАХ фототиристора в случае двух-электродного (динисторного) включения, которое определяет темновую характеристику фототиристоров. При освещении ток I , протекающий через структуру, будет определяться совместным действием фототоков I_{Φ} через переходы и собственным током коллекторного (центрального) перехода I_{K0} . Можно сказать, что величина $I_{\Phi 1} \alpha_1 + I_{\Phi 2} + I_{\Phi 3} \alpha_2$,

которая изменяется с изменением уровня освещенности, играет роль тока управления в обычном тиристоре, т. е. при воздействии потока излучения изменяется напряжение включения фототиристора. На рис. 5.57, б приведено семейство ВАХ фототиристора, освещаемого монохроматическим излучением, параметр семейства — поток излучения Φ .

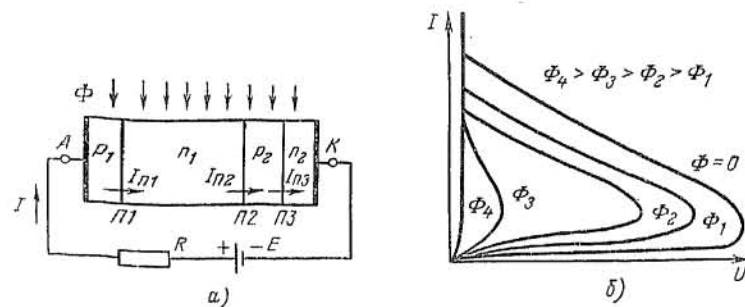


Рис. 5.57. Фототиристор:

а — структура; б — семейство выходных ВАХ $\Phi_1 < \Phi_2 < \Phi_3 < \Phi_4$

5.5. ОПТОПАРЫ

5.5.1. ЭЛЕМЕНТЫ ОПТОПАРЫ

Оптопарой называется оптоэлектронный прибор, содержащий излучатели и фотоприемники, оптически и конструктивно связанные друг с другом.

Принцип действия оптопары основан на двойном преобразовании энергии. В излучателях энергия электрического сигнала преобразуется в оптическое излучение, а в фотоприемниках, наоборот, оптический сигнал вызывает электрический ток или напряжение. Таким образом, оптопара представляет собой прибор с электрическими входными и выходными сигналами, т. е. связь с внешней схемой электрическая. Внутри оптопары связь входа с выходом осуществляется с помощью оптических сигналов. В электрической схеме такой прибор выполняет функцию выходного элемента — фотоприемника с одновременной электрической изоляцией (гальванической развязкой) входа и выхода. Однако сводить назначение оптопары только к обеспечению электрической изоляции было бы неверно. Введение с помощью оптопары оптического управления позволяет полу-

чить электронные устройства с исключительно своеобразными параметрами и характеристиками.

С точки зрения применения именно фотоприемник является определяющим элементом оптопары, а излучатель выбирается «под фотоприемник». С точки зрения конструктивно-технологической оба элемента — приемник и излучатель — являются «равноправными». Более того, излучателем в большинстве случаев определяются эффективность преобразования энергии и срок службы оптопары. Тем не менее еще раз следует подчеркнуть, что схемотехническое «лицо» оптопары определяет именно фотоприемник.

Принципиальные достоинства оптопар, обусловленные использованием фотонов в качестве носителей информации, заключаются в обеспечении высокой электрической изоляции входа и выхода, однонаправленности потока информации, отсутствии обратной связи с выхода на вход и широкой полосе пропускания.

Кроме того, важными достоинствами оптопар являются: возможность бесконтактного (оптического) управления электронными объектами и обусловленные этим разнообразие и гибкость конструкторских решений управления;

невосприимчивость оптических каналов связи к воздействию электромагнитных полей, что в случае оптопар с протяженным оптическим каналом обуславливает высокую помехозащищенность, а также исключает взаимные наводки;

возможность создания функциональных микрорелектронных устройств с фотоприемниками, характеристики которых под действием оптического излучения изменяются по заданному (сколь угодно сложному) закону;

расширение возможностей управления выходным сигналом оптопары путем воздействия (в том числе и неэлектрического) на оптический канал и, как следствие этого, создание разнообразных датчиков и приборов для передачи информации.

Современным оптопарам присущи и определенные недостатки:

низкий КПД, обусловленный необходимостью двойного преобразования энергии (электричество — излучение — электричество), и значительная потребляемая мощность;

сильная температурная зависимость параметров;

высокий уровень собственных шумов;

конструктивно-технологическое несовершенство, связанное в основном с использованием гибридной технологии.

Перечисленные недостатки оптопар по мере совершен-

ствования материалов, технологии, схемотехники постепенно устраняются. Широкое применение оптопар определяется прежде всего неповторимостью достоинств этих приборов.

Рассмотрим отдельные элементы оптопар подробнее (рис. 5.58).

Излучатель оптопары. Основным излучателем современных оптопар является инжекционный излучающий диод. В будущем — для создания сверхбыстродействующих оптопар ($t_{пер} \approx 10^{-9} \div 10^{-10}$ с) и мощных оптопар с протяженным оптическим каналом — применение полупроводниковых

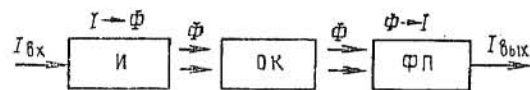


Рис. 5.58. Структура оптопары:

И — излучатель; *ОК* — оптический канал; *ФП* — фотоприемник

лазеров, характеризующихся высоким быстродействием и высокой направленностью излучения, может оказаться целесообразным и экономически оправданным.

Следует подчеркнуть отличия в конструкции оптического окна излучателя оптопары по сравнению с обычным излучающим диодом. Излучатель излучающего диода изготавливают с кольцевой излучающей областью вокруг расположенной в центре контактной площадки. В результате видимая область излучения как бы увеличивается на площадь контактной площадки. Для оптопары излучающая область должна быть минимальной по площади, что уменьшает краевые потери излучения. Минимальная площадь излучающей области ограничивается допустимой плотностью тока через излучатель. Контактная площадка в излучателе оптопары смещается из центра излучающей области. Это создает минимальное затенение и также уменьшает потери излучения при передаче к фотоприемнику. Малый размер излучающей области позволяет обеспечить, кроме того, стабильность условий оптической связи, сделать их практически независимыми от точности совмещения с приемным окном фотоприемника.

Оптический канал. Качество оптопары в значительной степени зависит от эффективности передачи энергии от излучателя к приемнику, т. е. от свойств оптического канала.

Для уменьшения потерь на отражение необходимо создать иммерсионную систему, в которой показатели преломления n оптической среды и материалов излучателя и фотоприемника были бы одинаковые. Такая цель принципиально достижима, так как у основных используемых полупроводниковых материалов значения n близки друг к другу.

В оптопарах используют следующие конструктивные виды оптических каналов:

связь через воздух, которая характеризуется простотой и высокой электрической изоляцией;

связь через воздух с использованием оптической фокусировки с помощью линз, что обеспечивает лучшую передачу излучения по сравнению с прямой связью через воздух;

связь с использованием иммерсионной среды, что обеспечивает наилучшие параметры оптического канала;

связь с использованием отрезка световода (обычно жесткого моноволокна), которая удобна при создании оптоизоляторов с допустимым напряжением изоляции свыше 20—50 кВ.

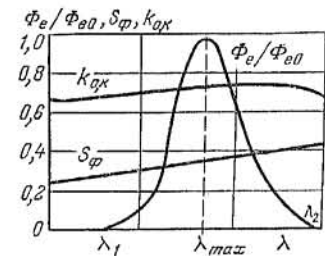


Рис. 5.59. Спектральные характеристики элементов оптопары

Таким образом, при выборе типа оптического канала необходимо в зависимости от применения оптопары удовлетворить следующие требования:

1) обеспечить заданный уровень электрической изоляции между входом и выходом оптопары (между излучателем и фотоприемником);

2) согласовать материал оптического канала с излучателем и фотоприемником спектрально, т. е. обеспечить высокую прозрачность для излучения в рабочем диапазоне длин волн;

3) снизить до минимума потери на отражение на границах излучатель — оптический канал и оптический канал — фотоприемник.

При выборе оптического канала требования к изоляции оказываются решающими, если расстояние между излучателем и фотоприемником мало. Если же расстояние достаточно велико, например, при использовании световодов, изолирующие свойства становятся менее важными. Зато

большое значение приобретает спектр пропускания оптического канала, который является составной частью спектральной характеристики системы И—ОК—ФП (рис. 5.59).

Мерой согласования спектральных характеристик элементов оптопары служит коэффициент спектрального согласования k_λ . Он определяется интегрированием произведения спектров всех элементов, входящих в систему:

$$k_\lambda = \frac{\int \frac{\Phi_e(\lambda)}{\Phi_{e0}} S_\phi(\lambda) k_{o,k}(\lambda) d\lambda}{\int \frac{\Phi_e(\lambda)}{\Phi_{e0}} d\lambda}, \quad (5.62)$$

где $\Phi_e(\lambda)/\Phi_{e0}$ — нормализованная спектральная характеристика излучателя в относительных единицах (Φ_{e0} — поток излучения в максимуме спектральной характеристики излучателя, т. е. при $\lambda = \lambda_{max}$); $S_\phi(\lambda)$ — спектральная характеристика фотоприемника (в относительных единицах); $k_{o,k}(\lambda)$ — спектральная характеристика оптического канала в относительных единицах ($k_{o,k}$ — коэффициент пропускания оптического канала).

Пределы интегрирования определяются коротковолновой (λ_1) и длинноволновой (λ_2) границами спектра излучателя.

В общем случае материал оптического канала имеет отличный от излучателя и фотоприемника показатель преломления n . Известно, что при распространении оптического излучения из среды с показателем преломления n_1 в среду с показателем преломления n_2 часть излучения отражается обратно от границы раздела и теряется. Эти потери излучения называются френелевскими. Коэффициент отражения

$$R_{Фр} = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2. \quad (5.63a)$$

Так как разность показателей преломления входит в формулу квадратично, то френелевские потери не зависят от того, входит ли излучение из среды с меньшим показателем преломления в среду с большим или, наоборот, из среды с большим показателем преломления в среду с меньшим показателем. Коэффициент пропускания границы раздела

$$T_{Фр} = 1 - R_{Фр} = 1 - \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 = \frac{4n_2 n_1}{n_2^2 + 2n_1 n_2 + n_1^2}. \quad (5.63б)$$

Коэффициент вывода излучения $\eta_{Фр}$, учитывающий френелевские потери, получается при делении числителя и знаменателя выражения (5.63б) на произведение $n_2 n_1$:

$$\eta_{\text{Фр}} = \frac{4}{2 + n_2/n_1 + n_1/n_2}. \quad (5.63\text{в})$$

Например, для кристалла излучателя на основе GaAsP ($n=3,4$), излучающего непосредственно в воздух ($n_2=1$), коэффициент вывода излучения, учитывающий лишь френелевские потери,

$$\eta_{\text{Фр}} = \frac{4}{2 + 1/3,4 + 3,4/1} = 0,702,$$

т. е. только 70,2 % излучения, достигающего поверхности кристалла излучателя, проходит через границу раздела между кристаллом и воздушным оптическим каналом.

Френелевские потери можно уменьшить ($\eta_{\text{Фр}}$ увеличить), если поверхность излучателя и фотоприемника покрыть промежуточным материалом с подходящим показателем преломления. Такие материалы называются просветляющими покрытиями. Одновременно они служат изоляцией, так как материалы покрытий являются диэлектриками.

Например, для оптопары с излучателем из GaAsP ($n_1=3,6$) и кремниевым фотоприемником ($n_2=3,5$) с воздушным оптическим каналом ($n=1$) и оптическим каналом на основе пластмассового просветляющего покрытия ($n=1,5$) получим

$$\eta_{\text{Фр}} = \eta_{\text{Фр}_1} \eta_{\text{Фр}_2} = \frac{4}{2 + 3,6/n + n/3,6} \frac{4}{2 + n/3,5 + 3,5/n} = \begin{cases} 0,47 & \text{для } n=1; \\ 0,698 & \text{для } n=1,5, \end{cases}$$

т. е. при введении просветляющего покрытия френелевские потери уменьшаются почти в 1,5 раза.

Фотоприемник. Наиболее распространенными типами фотоприемников в современных оптопарах являются *p-i-n* фотодиоды, фототранзисторы и фототиристоры. Спектральная характеристика таких фотоприемников охватывает весь видимый диапазон спектра и часть ближней ИК-области.

Кремниевые фотодиоды являются хорошими фотоприемниками, однако для получения выходных сигналов требуемой амплитуды необходимо дополнять фотодиод усилителем. Повышать коэффициент усиления путем использования внешних по отношению к корпусу оптопары элементов неэффективно, так как увеличиваются габариты схемы. Целесообразнее поместить усилитель внутри корпуса оптопары. Это можно осуществить двумя способами. По первому

способу используется гибридная технология, которая допускает раздельное согласование фотодиода и усилителя и, как следствие этого, хорошие оптические и электрические параметры оптопары.

По второму способу — интегральному — снижается стоимость изготовления оптопары, но получаются худшие параметры.

Существуют два способа интеграции фотоприемника и усилителя:

- 1) использование фототранзистора, в котором приемником излучения является коллективный переход;
- 2) использование фотодиода, фототок которого усиливается транзистором, размещенным на том же кристалле.

Широкое применение в оптопарах получили составные фототранзисторы и фототиристоры.

5.5.2. ВХОДНЫЕ И ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОПТОПАР

В системе параметров оптопар можно выделить четыре группы: входные параметры (излучателя), выходные параметры (фотоприемника), передаточные параметры (параметры передачи сигнала со входа на выход) и параметры изоляции.

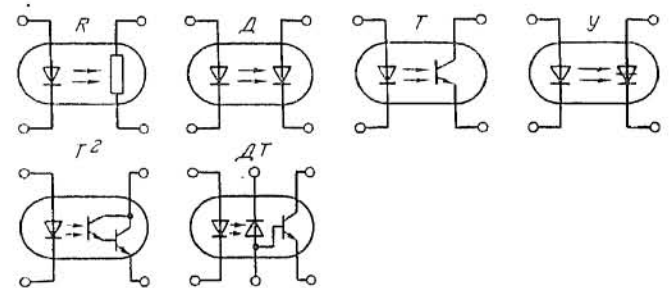


Рис. 5.60. Условные обозначения оптопар

Для наиболее распространенных оптопар будем использовать следующие сокращения: Д — диодная, Т — транзисторная, У — тиристорная, Т² — с составным фототранзистором, ДТ — диодно-транзисторная. На рис. 5.60 приведены обозначения оптопар в схемах.

Входная цепь оптопар описывается следующими (обычными для излучающих диодов) основными параметрами: номинальный входной ток $I_{вх,ном}$ — значение тока, рекомендуемое для оптимальной эксплуатации оптопары и используемое при измерении ее основных параметров;

входное напряжение $U_{вх}$ — падение напряжения на излучающем диоде в прямом направлении при заданном значении прямого тока (обычно при $I_{вх,ном}$);

входная емкость $C_{вх}$ — емкость между входными выводами оптопары в заданном режиме.

Т а б л и ц а 5.3. Выходные параметры оптопар

Параметр	Определение	Вид оптопары
Максимально допустимое обратное выходное напряжение $U_{вых,обрт ax}$	Максимальное значение обратного напряжения любой формы, которое допускается прикладывать к выходу оптопары	Т, Т ² , ДТ, Д, У
Максимально допустимый выходной ток $I_{вых}$	Максимальное значение тока, который допускается пропускать через фотоприемник во включенном состоянии оптопары	Т, Т ² , ДТ, У
Ток утечки на выходе $I_{ут}$	Ток на выходе оптопары при $I_{вх}=0$ и заданном значении и полярности $U_{вых}$	Т, Т ² , ДТ, Д, У
Выходное остаточное напряжение (напряжение насыщения) $U_{ост}$	Значение напряжения на включенном фототиристоре или фоторезисторе в режиме насыщения	Т, Т ² , У
Выходная емкость $C_{вых}$	Емкость фотоприемника	Все типы

Кроме того, используются предельные входные параметры:

максимальный входной ток $I_{вхmax}$ — максимальное значение постоянного прямого тока, который допускается пропускать через излучающий диод оптопары;

обратное входное напряжение $U_{вх,обр}$ — максимальное значение обратного напряжения любой формы (постоянное, импульсное, синусоидальное и др.), которое может быть приложено к входу оптопары в обратном направлении.

Выходные параметры оптопар — параметры фотоприемников оптопар — сведены в табл. 5.3.

5.5.3. ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ПАРАМЕТРЫ ИЗОЛЯЦИИ ОПТОПАР

Передачные параметры характеризуют эффективность передачи электрического сигнала с входа оптопары на выход. Эффективность передачи энергии сигнала описывают коэффициентом передачи (обычно по току), а скорость передачи сигнала — временными параметрами.

Основным параметром, который характеризует передачу сигнала со входа оптопары на ее выход, для всех типов оптопар (кроме тиристорных) является коэффициент передачи по току k_I , т. е. отношение тока на выходе оптопары $I_{вых}$ к вызвавшему его входному току $I_{вх}$:

$$k_I = I_{вых} / I_{вх} \quad (5.64)$$

Зависимость $I_{вых} = f(I_{вх})$, которая называется передаточной характеристикой, в общем случае нелинейная для оптопар. При этом различают статический коэффициент передачи k_I , который определяется по формуле (5.64), и дифференциальный коэффициент передачи

$$k_{Id} = \lim_{\Delta I_{вх} \rightarrow 0} \frac{\Delta I_{вых}}{\Delta I_{вх}} = \frac{dI_{вых}}{dI_{вх}} \quad (5.65)$$

Нелинейность передаточной характеристики связана с нелинейностью излучательной характеристики излучателя оптопары, а также с зависимостью k_{Id} фотоприемника от выходного тока.

Тиристорная оптопара работает только в ключевом режиме, и параметр k_I для нее не имеет смысла. Передаточная характеристика здесь определяется входным током тиристорной оптопары, при котором фототиристор включается. В паспорте на тиристорную оптопару задается значение тока включения — минимальное значение входного тока, при котором гарантируется надежное отпирание фототиристора. Кроме того, задается максимально допустимый входной ток помехи $I_{номmax}$ — максимальное значение входного тока тиристорной оптопары, при котором фототиристор не включается. Параметр $I_{номmax}$ характеризует помехоустойчивость тиристорной оптопары.

Быстродействие оптопар характеризуют следующие временные параметры переходной характеристики выходного тока $i_{вых}(t)$, получаемой при подаче на вход прямоугольного импульса с амплитудой $I_{вх}$ (рис. 5.61):

время нарастания выходного тока $t_{нар}$ — время нараста-

ния выходного тока от уровня $0,1 I_{\text{вых макс}}$ до уровня $0,9 I_{\text{вых макс}}$;

время задержки при включении $t_{\text{зд}}$ —время от момента подачи t_0 импульса входного тока до момента нарастания выходного тока до уровня $0,1 I_{\text{вых макс}}$.

Сумма времени задержки и времени нарастания при включении составляет время включения $t_{\text{вкл}}$ оптопары: $t_{\text{вкл}} = t_{\text{зд}} + t_{\text{нар}}$. Аналогичным образом определяются время спада $t_{\text{сп}}$, время задержки при выключении и время выключе-

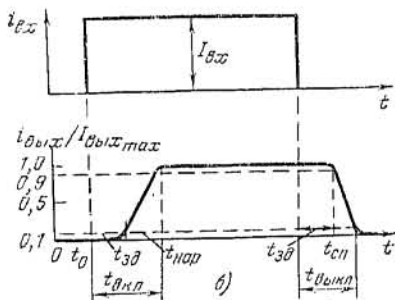


Рис. 5.61. Диаграммы переключения оптопары

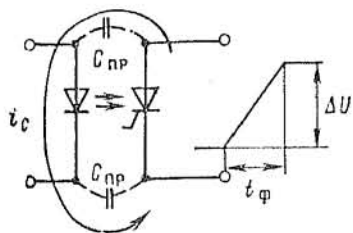


Рис. 5.62. Влияние проходной емкости оптопары

ния. Быстродействие оптопары характеризуется временем переключения $t_{\text{пер}} = t_{\text{вкл}} + t_{\text{выкл}}$.

Быстродействие некоторых классов оптопар задается граничной частотой $f_{\text{гр}}$ или максимальной скоростью передачи информации F . Оба параметра связаны со значением времени переключения.

Параметрами электрической изоляции оптопар являются максимально допустимое пиковое $U_{\text{из,пик}}$ и статическое напряжение изоляции $U_{\text{из}}$ между входом и выходом, сопротивление изоляции $R_{\text{из}}$, проходная емкость $C_{\text{пр}}$ и максимально допустимая скорость нарастания выходного напряжения $(dU/dt)_{\text{макс}}$. Важнейший параметр $U_{\text{из,пик}}$ —именно он определяет возможности оптопары как элемента электрической изоляции. Пиковое напряжение изоляции ($U_{\text{из,пик}}$)—пиковое значение напряжения с заданными параметрами длительности и частоты повторения, которое может быть приложено между входом и выходом оптопары и при котором сохраняется электрическая прочность оптопары. Статическое максимально допустимое напряжение

между входом и выходом $U_{\text{из}}$ определяет электрическую прочность оптопары при постоянном напряжении (в статическом режиме). В статическом режиме задается также сопротивление изоляции $R_{\text{из}}$ (при $U_{\text{из}}$). Параметры $C_{\text{пр}}$ и $(dU/dt)_{\text{макс}}$ определяют стойкость оптопары к скачкам напряжения на выходе. При таких скачках с высокой скоростью нарастания напряжения через излучатель оптопары может протекать емкостный ток i_c (рис. 5.62):

$$i_c = \frac{1}{2} \frac{dU}{dt} C_{\text{пр}}, \quad (5.66)$$

где $C_{\text{пр}}$ —проходная емкость оптопары (емкость между входом и выходом оптопары).

При достаточном токе i_c может произойти ложное включение оптопары. Амплитуда напряжения $U_{\text{мах}}$ при этом может быть значительно меньше $U_{\text{из,пик}}$.

Обратная связь по постоянному току в оптопарах практически исключается, так как сопротивление изоляции $R_{\text{из}} \approx 10^{12}$ Ом. Связь по переменному току может быть значительной, так как проходная емкость, характерная для большинства оптопар, равна примерно 1 пФ. В настоящее время единственной мерой уменьшения $C_{\text{пр}}$ является увеличение расстояния между входом и выходом оптопары. Такие оптопары, как правило, имеют высокую стоимость, так как в оптический канал таких приборов для сохранения КПД необходимо вводить линзы или световоды.

5.5.4. РЕЖИМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДИОДНЫХ ОПТОПАР

Типичным представителем этого класса являются оптопары, состоящие из арсенидогаллиевого излучателя и кремниевое p - n фотодиода, которые связаны кремнийорганической оптической средой.

При эксплуатации оптопар такого типа трудно получить $t_{\text{пер}} = 20 \div 40$ нс, которое приводится в паспорте таких приборов. В самом деле, при тех малых выходных токах, которые обеспечивает эта оптопара, ее нагрузка должна быть 1—10 кОм, что при собственной выходной емкости оптопары около 10 пФ дает постоянную времени перезаряда, равную примерно 0,1—1 мкс. Таким образом, быстродействие такого типа оптопар определяется чаще всего ее выходной емкостью. Быстродействие оптопар, которое задается в справочниках, определяется при работе на нагрузку

50 Ом, что практически характеризует предельное быстродействие оптопары, и достижимо при особом построении цепи нагрузки.

Основные зависимости временных параметров быстродействия диодных оптопар от режима эксплуатации приведены на рис. 5.63. Изменение входного тока оптопары поразному влияет на изменение $t_{нар}$ и $t_{сп}$, т. е. $t_{пер}$ практически не меняется. Характерно, что уже при $U_{обр} = 3 \div 5$ В переходные процессы в $p-i-n$ фотодиоде протекают столь быстро, что быстродействие оптопары определяется излучателем и поэтому от напряжения на фотодиоде не зависит.

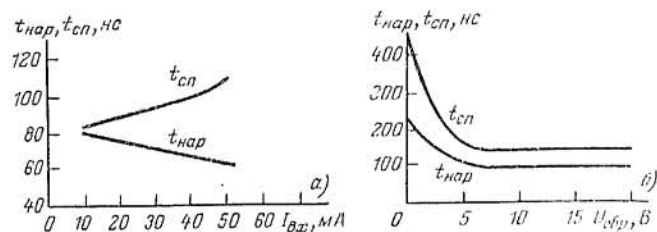


Рис. 5.63. Зависимости временных параметров оптопар от режима: а — от входного тока; б — от обратного напряжения

Для диодных оптопар характерна относительно слабая температурная зависимость k_I (рис. 5.64), обусловленная главным образом зависимостью от температуры T параметров излучателя; в диапазоне от -60 до $+85$ °С зависимость $k_I = f(T)$ практически линейна и характеризуется температурным коэффициентом:

$$\frac{dk_I}{dT} / k_I \approx -0,5 \% / ^\circ\text{C}.$$

В классе диодных оптопар выделяют обычно так называемые оптоизоляторы, которые между излучателем и фотоприемником имеют жесткий световод, упакованный в специальный корпус длиной 40—100 мм. Прходная емкость при этом падает до ничтожных значений, около 0,01 пФ, а электрическая прочность повышается до 20—50 кВ.

Диодные оптопары обладают наиболее линейной передаточной характеристикой среди других типов оптопар и широко применяются для передачи аналогового сигнала.

Широкий диапазон рабочих частот, малый уровень соб-

ственных шумов, слабая температурная зависимость параметров — это также преимущества диодных оптопар с точки зрения их применения в аналоговых устройствах.

Значение коэффициента передачи по току k_I диодной оптопары можно увеличить, введя в выходную цепь интегральный усилитель. Основная трудность передачи аналогового сигнала заключается прежде всего в узком диапазоне линейности передаточной характеристики и низкой степени этой линейности. Типичная передаточная характеристика — зависимость $I_{вых} = f(I_{вх})$ для диодной оптопары (рис. 5.65) — линейна в диапазоне от $I_{вх min}$ до $I_{вх max}$. При малых входных токах ($I_{вх} < I_{вх min}$) излучательная способность излучателя оптопары еще не достигает нормального уровня. При больших входных токах ($I_{вх} > I_{вх max}$) начинается сказываться разогрев структуры и, как след-

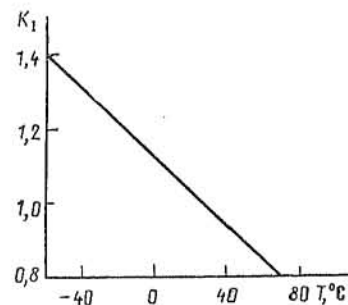


Рис. 5.64. Зависимость коэффициента передачи тока от температуры

ствие, температурное изменение параметров. На рис. 5.6 представлена также зависимость коэффициента передачи по току в относительных единицах $k_I/k_{I_0} = f(I_{вх})$, где $k_{I_0} = I_{вых} / I_{вх}$ — коэффициент передачи по току на линейном участке передаточной характеристики; кроме того, видно, что на краях рабочего диапазона (при $I_{вх} = I_{вх min}$ и $I_{вх} = I_{вх max}$) коэффициент передачи по току k_I уменьшается. При заданном диапазоне изменения входного тока нелинейность k_I оптопары задается в процентах:

$$(k_{I_0} - k_I) / k_{I_0} = \Delta k_I \cdot 100 / k_{I_0}. \quad (5.67)$$

Используя современные диодные оптопары (например, АОД 101), при хорошей термостабилизации можно обеспечить передачу аналогового сигнала с нелинейностью 1—5% при $I_{вх max} / I_{вх min} \approx 2 \div 3$. Снижение нелинейности ведет к резкому сужению рабочего диапазона токов. Существенно осложняет задачу некачественной передачи аналогового сигнала через оптопару большой разброс параметров, а также большая временная нестабильность этих параметров (примерно 5—20% за 100 000 ч.)

Значительно повышается качество передачи аналогового сигнала при использовании дифференциальной диодной оптопары. Рассмотрим принцип улучшения линейности передаточной характеристики с помощью дифференциальной диодной оптопары на примере схемы рис. 5.66. СИД оптопары облучает два однотипных, имеющих одинаковые параметры фотодиода $\Phi Д_1$ и $\Phi Д_2$. Ток СИД $I_{сд}$ в такой схеме определяется не только входным током $I_{вх}$, но и током обратной связи $I_{\phi 1}$:

$$I_{сд} = k_1 (I_{вх} - I_{\phi 1}) = k_1 (I_{вх} - k_{I_1} I_{сд}), \quad (5.68)$$

где k_1 — коэффициент усиления каскада A_1 ; k_{I_1} — коэффициент передачи по току оптопары СД— $\Phi Д_1$.

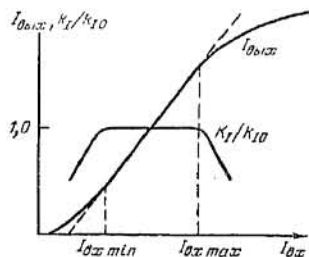


Рис. 5.65. Передаточная характеристика диодной оптопары

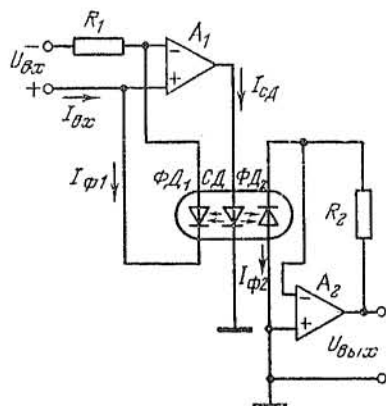


Рис. 5.66. Усилитель с дифференциальной оптопарой

Из (5.68) имеем

$$I_{сд} = k_1 I_{вх} / (1 + k_1 k_{I_1}). \quad (5.69)$$

При глубокой обратной связи ($k_1 k_{I_1} \gg 1$) ток СИД $= I_{вх} / k_{I_1}$ и фототок $I_{\phi} = k_{I_2} I_{вх} / k_{I_1}$. Для однотипных оптопар коэффициенты k_{I_1} и k_{I_2} одинаковы и изменяются в равной степени. В результате $i_{\phi 2}(t) = i_{вх}(t)$ и не зависит от нелинейности и нестабильности характеристик оптопары. Усиление полезного сигнала обеспечивается каскадом A_2 . Нелинейность усиления такого усилителя с дифференциальной оптопарой составляет 0,01—0,2 %, стабильность k_I в течение 100 000 ч равна 0,075 %.

Особым случаем эксплуатации следует считать работу диодных оптопар в фотогальваническом режиме (рис. 5.67). Основным требованием к таким оптопарам — источникам энергии с электрической изоляцией — является высокий КПД:

$$\eta = P_{вых} / P_{вх}, \quad (5.70a)$$

где $P_{вых}$ — максимальная мощность, которая может быть отдана фотоприемником в нагрузку. Для типичной ВАХ

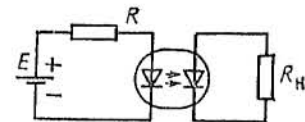


Рис. 5.67. Диодная оптопара в фотогальваническом режиме

$P_{вых} = a I_k U_x$, где $a = 0,7 \div 0,8$ (см. рис. 5.45). Подставляя значение выходного тока I_k из (5.64), получаем

$$\eta = a k_I U_x / U_{вх}. \quad (5.70b)$$

Следует иметь в виду, что в данном выражении используется значение k_I , измеренное в режиме короткого замыкания на выходе; кроме того, для таких оптопар выгодно использовать фотоприемники на основе широкозонных полупроводников, которые обеспечивают большое значение U_x .

Оптопары, предназначенные для эксплуатации в фотогальваническом режиме, характеризуются большим значением $k_I \geq 3 \div 4 \%$; измерение k_I производится без приложения обратного напряжения.

5.5.5. РЕЖИМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАНЗИСТОРНЫХ ОПТОПАР

В этих приборах значение выходного тока обычно достаточно для действия последующих устройств.

В качестве фотоприемника чаще всего используются кремниевые планарные транзисторы $n-p-n$ с внешними выводами только эмиттера и коллектора, иногда выводят и базовый электрод. В качестве излучателя используются арсенидогаллиевые излучающие диоды.

Характеристики транзисторной оптопары существенно отличаются от аналогичных характеристик диодной. Пере-

даточная характеристика по току существенно отклоняется от линейной зависимости, причем тем больше, чем выше усилительные свойства самого транзистора и чем больше входной ток. Температурная зависимость коэффициента передачи по току иллюстрируется рис. 5.68. При больших входных токах (кривая 2) эта зависимость такая же, как и у диодной оптопары, при малых (кривая 1) существенно отличается. Характер рассмотренных зависимостей объясняется видом зависимости излучательной способности излучателя и коэффициента передачи фототранзистора от температуры и тока.

Существенное повышение коэффициента передачи возможно в оптопаре с составными фототранзисторами. Одна-

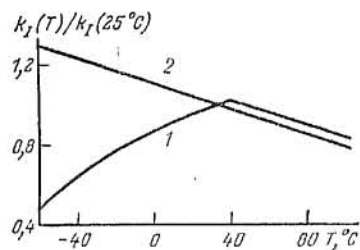
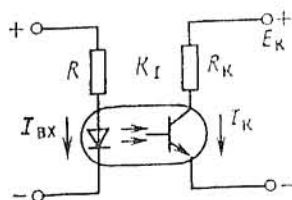


Рис. 5.68. Зависимость коэффициента передачи тока транзисторной оптопары от температуры

Рис. 5.69. Транзисторная оптопара в ключевом режиме эксплуатации



ко при этом обычно значительно снижается быстродействие и ухудшается температурная стабильность. Так, при изменении температуры от 25 до 100°C темновой ток составного транзистора возрастает на 4—5 порядков величины, тогда как у обычного фототранзистора это изменение не превышает 2—3 порядков. В результате приходится снижать предельную рабочую температуру оптопары.

Вследствие, прежде всего, высокой нелинейности передаточной характеристики транзисторных оптопар, а также сильной температурной зависимости параметров, высокого уровня шумов и узкой полосы рабочих частот транзисторные оптопары относительно редко применяются для передачи аналогового сигнала.

Основной режим эксплуатации транзисторных оптопар — ключевой. Простейший ключ на транзисторной опто-

паре изображен на рис. 5.69. Критерий насыщения фототранзистора оптопары при заданном коллекторном токе насыщения $I_{Кн}$ можно представить в виде

$$I_{вх} \geq I_{вх,гр} = I_{Кн} / k_T \approx E_{Кл} / R_K k_T \quad (5.71)$$

где $I_{вх,гр}$ — входной граничный ток оптопары.

Наибольший коэффициент передачи по току k_T (до 100 и более) и наибольшее значение выходных токов и напряжений имеют оптопары с составным транзистором. Однако этот класс транзисторных оптопар обладает наилучшим быстродействием ($t_{пер} \approx 100$ мкс). Наибольшее быстродействие имеют диодно-транзисторные оптопары ($t_{пер} \approx 2$ мкс).

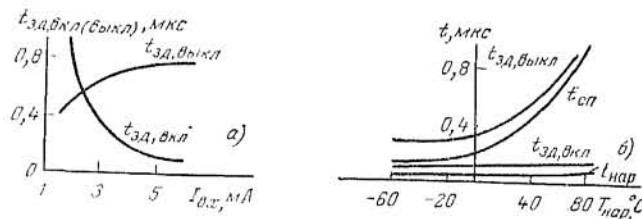


Рис. 5.70. Зависимости временных параметров диодно-транзисторных оптопар:

а — от входного тока; б — от температуры

Зависимости временных параметров от выходного тока (рис. 5.70, а) носят характер, аналогичный зависимостям диодных оптопар; подтверждается общая для всех оптопар с СИД особенность — резкое возрастание $t_{зд}$ при переходе к малым $I_{вх}$ (для большинства транзисторных оптопар область $I_{вх} < 10$ мА является нерабочей областью). При повышении температуры инерционность транзисторных оптопар увеличивается (рис. 5.70, б).

5.5.6. СИСТЕМА ОБОЗНАЧЕНИЙ ОПТОПАР

Рассмотрим систему обозначений оптопар, выпускаемых в СССР. Обозначение отечественных оптопар состоит из семи элементов, например АОД 101Б. Первые три элемента обозначения — буквы: первая буква определяет материал излучателя (А—GaAs и GaAlAs), вторая буква (буква О) указывает на принадлежность прибора к классу оптопар; третья буква показывает тип фотоприемника

(Д — фотодиод, Т — фототранзистор, У — фототиристор и т. д.). За тремя буквами в обозначении следует трехзначный порядковый номер и, наконец, буква, определяющая группу приборов данного типа.

У бескорпусных оптопар в конце обозначения добавляется еще одна цифра, характеризующая вид конструктивного исполнения. Например, АОД 120А-1 — бескорпусная диодная оптопара, порядковый номер 120, исполнение 1 (с гибкими выводами), группа А ($k_I = 1\%$).

Контрольные вопросы

1. Перечислите и дайте определение оптическим параметрам СИД. Оцените относительное пропускание фильтра контраста для СИД с $\lambda_{max} = 585$ нм.

2. Определите основные особенности излучающих диодов на основе гетероструктур.

3. Дайте определение лазера, лазерного усиления, населенности и инверсии населенности, порога генерирования лазера, расходимости лазерного излучения. Определите необходимые условия генерации лазерного излучения.

4. Определите условия лазерного усиления в инжекционном лазере. Перечислите и поясните особенности эксплуатации полупроводниковых лазеров по сравнению с лазерами других типов.

5. Нарисуйте семейство ВАХ фотодиода. Покажите области ВАХ, соответствующие диодному и фотогальваническому режимам работы фотодиода. Поясните, почему в отличие от обычного диода фотодиод не может работать при прямом смещении.

6. Поясните физические причины повышения быстродействия фотодиодов с *p-i-n* структурой, со структурой металл — полупроводник и гетероструктурой. Определите преимущества и недостатки лавинных фотодиодов.

7. Определите, произойдет ли включение тиристорной оптопары типа АОУ 103, если между анодом и катодом тиристора оптопары появится импульс прямого напряжения с амплитудой $\Delta u_a = 200$ В и длительностью фронта 1 мкс.

8. Определите граничное минимальное значение входного тока транзисторной оптопары типа АОТ 123Б, обеспечивающее насыщение транзистора оптопары при $E_k = 20$ В, $R_k = 1$ кОм.

9. Оцените минимально необходимую длительность импульса управления тиристорной оптопарой при включении на активно-индуктивную нагрузку: напряжение анодного питания 200 В, сопротивление нагрузки 10 Ом, индуктивность нагрузки 50 мГн, ток включения тиристора 50 мА, амплитуда тока управления 100 мА,

Глава шестая

МОДЕЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

6.1. МОДЕЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ В СИСТЕМЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

6.1.1. ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

В зависимости от степени использования ЭВМ при проектировании электронных устройств можно выделить четыре уровня.

1. На первом уровне с помощью ЭВМ проводится расчет по отдельным формулам.

2. Второй, более высокий уровень применения ЭВМ характеризуется использованием стандартных программ общего математического обеспечения.

3. На третьем уровне используются специальные программы проектирования заданного класса электронных устройств.

4. На четвертом уровне проектирования специальные программы объединяются в одну систему, обеспечивающую автоматизацию основных трудоемких вычислительных операций.

Сам процесс проектирования электронного устройства разбивается на ряд последовательных этапов, для каждого из которых разрабатываются соответствующие математические, программные и технические средства автоматизации проектирования.

Разработка принципиальной схемы является важнейшим этапом проектирования электронного устройства, в который входят (рис. 6.1):

I. Синтез (выбор) принципиальной схемы на основе опыта создания схем подобного класса (блоки 1, 2а). Общих регулярных алгоритмов для синтеза схем большинства электронных устройств не существует, и выбор схемы неоднозначен. Собственный опыт разработчика и его интуиция играют при этом существенную роль.

II. Выбор типов элементов схемы и формирование математических моделей элементов. Запоминание моделей в библиотеке моделей внешней памяти ЭВМ, составление уравнений функционирования устройства на основе информации, содержащейся в техническом задании и в библиотеке моделей (блоки 2б, 3, 4).