

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение
высшего профессионального образования
«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Методические указания к практическим занятиям
для студентов направления
210100 – Электроника и микроэлектроника
(Специальность 210105 – Электронные приборы и устройства)

2012

Орликов Леонид Николаевич

Твердотельные устройства: методические указания к практическим занятиям для студентов направления 210100 – Электроника и микроэлектроника (Специальность 210105 – Электронные приборы и устройства)/ Л.Н. Орликов. Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск : ТУСУР, 2012. – 15 с.

Предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению 210100 – Электроника и микроэлектроника (Специальность 210105 – Электронные приборы и устройства) по курсу «Твердотельные устройства».

© Орликов Леонид Николаевич, 2012

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение
высшего профессионального образования
«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ
Зав.кафедрой ЭП
_____ С.М. Шандаров
« ____ » _____ 2012 г.

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Методические указания к практическим занятиям
для студентов направления
210100 – Электроника и микроэлектроника
(Специальность 210105 – Электронные приборы и устройства)

Разработчик

_____ Л.Н. Орликов
« ____ » _____ 2012 г

Содержание

1	Введение.....	5
2	Полупроводниковые диоды	5
	2.1 Примеры решения задач по теме.....	5
	2.2 Задачи для проработки темы	6
3	Биполярные транзисторы	6
	3.1 Примеры решения задач по теме.....	6
	3.2 Задачи для проработки темы	9
4	Полевые транзисторы	9
	4.1 Примеры решения задач по теме.....	9
	4.2 Задачи для проработки темы	10
5	Свервысокочастотные (СВЧ).....	10
	5.1 Примеры решения задач по теме.....	10
	5.2 Задачи для проработки темы	13
6	Фотоприемники.....	13
	5.1 Основные понятия.....	13
	5.2 Примеры решения задач по теме.....	14
	5.3 Задачи для проработки темы	14

1 Введение

Данное пособие составлено с целью облегчить и углубить изучение электронных приборов и устройств на их основе. Задачи составлены на основе общих закономерностей протекания тока в электронных приборах. Формулы для вычислений взяты из лекционного материала. В ряде случаев рекомендуется проанализировать принцип работы электронного прибора и особенность синтеза устройств на его основе. В предлагаемом пособии приводится значительное число узловых задач с решениями. Решение задач позволяет уяснить физический смысл явлений, закрепляет навыки применения теоретических знаний. Это позволяет развить навыки самостоятельной работы и делать расчеты в условиях, приближенных к практике. Значительное место уделено полупроводниковым приборам и устройствам, как основе для развития устройств современной электроники. В пособии рассматриваются задачи на применение устройств с полупроводниковыми диодами, биполярными и полевыми транзисторами, приборами сверхвысоких частот, а также фотоэлектронными приборами и устройствами. Материал отдельных разделов достаточно независим, что позволяет использовать его для анализа процессов в различного типа электронных приборов и устройств и тенденций их развития.

2 Полупроводниковые устройства на диодах

2.1 Примеры решения задач по теме

Задача 1. Устройство с идеальным диодом включено в схему по рис.2.1. Входное напряжение $U_{вх} = 40$ В. Сопротивление в цепи диода $R = 20$ кОм. Определить выходное напряжение. Для каких целей может использоваться устройство?

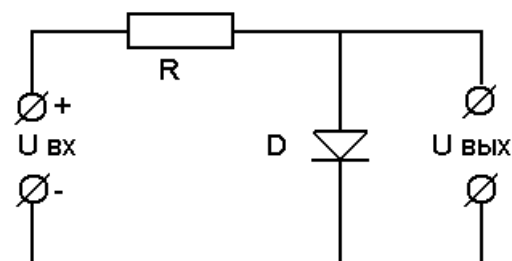


Рисунок 2.1– Схема включения диода.

Решение. Поскольку на диод подано обратное смещение, то можно предположить, что обратное сопротивление диода составляет несколько сотен килоом или даже больше. Следовательно, можно считать, что практически все напряжение падает на диоде, т. е. $U_{вых} = 15$ В. (Стабилизатор).

Задача 2. Определить выходное напряжение в схеме по рис. 2.1, если при комнатной температуре используется кремниевый диод, имеющий тепловой ток $I_0 = 10 \text{ мкА}$.

Решение.

Поскольку на диод подано прямое смещение, то сопротивление кремниевых диодов будет определяться в основном сопротивлением резистора $R_H = 20 \text{ кОм}$. Следовательно, $I = 40 / 20 \cdot 10^3 = 2 \text{ мА}$. Подставив это значение в уравнение для тока полупроводникового диода и решив его относительно U , получим следующее:

$$I = I_0 \cdot (e^{eU/kT} - 1); \quad 2 \text{ мА} = 10 \text{ мкА} \cdot (e^{eU/kT} - 1); \quad e^x = 201;$$

$$x = eU / kT = 5,31; \quad kT / e \approx 26 \text{ мВ}.$$

$$\text{Следовательно, } U = 5,31 \cdot 26 \text{ мВ} = 0,138 \text{ В} \approx 0,14 \text{ В}$$

2.2 Задачи для проработки темы

Задача 2.1. Спроектировать схему выпрямительного устройства. Рассчитать и построить на графике вольт-амперную характеристику идеального полупроводникового диода при комнатной температуре (300К), если тепловой ток $I_0 = 10 \text{ мкА}$. Расчет провести в интервале напряжения от 0 до -10 В (через 1 В) и от 0 до 0,2 В (через 0,05 В).

Задача 2.2. Проанализировать устройство с диодом. Рассчитать и построить на графике вольт-амперную характеристику идеального полупроводникового диода при комнатной температуре (300К), если тепловой ток $I_0 = 10 \text{ мкА}$. Диод имеет омическое сопротивление p и n – областей равное 25 Ом. Расчет провести в интервале напряжения от 0 до -10 В (через 1 В) и от 0 до 0,2 В (через 0,05 В).

3 Биполярные транзисторы

3.1 Примеры решения задач по теме

Задача 1. В некотором устройстве имеется транзистор. Концентрации примесей в базе, эмиттере и коллекторе этого транзистора p - n - p и ширина базы контролируются так, что только 1% дырок, инжектируемых из эмиттера, теряется при рекомбинации в базе. Пренебрегая токами утечки, найти коэффициент передачи тока эмиттера, эффективность эмиттера, коэффициент переноса, если электронная составляющая тока эмиттера $I_{пэ} = 0,01 I_{э}$ (коэффициент умножения в коллекторном переходе принять равным единице).

Решение. Эффективность эмиттера (коэффициент инжекции)

$$\gamma = I_{пэ} / (I_{пэ} + I_{нэ}) = (I_{э} - I_{нэ}) / I_{э} = 1 - I_{нэ} / I_{э} = 1 - 0,01 = 0,99$$

Коэффициент переноса

$$\beta^* = I_{pK}/I_{pЭ} = (I_{pЭ} - 0.01I_{pЭ})/I_{pЭ} = 0.99$$

Коэффициент передачи тока эмиттера

$$\alpha = \gamma\beta * M$$

Где коэффициент умножения $M=1$. Следовательно,

$$\alpha = 0.99 \cdot 0.99 \cdot 1 = 0.98$$

Задача 2. Транзистор, имеющий $\alpha = 0.995$, $\alpha_1 = -0.1$, $I_{ЭБК} = 10^{-14}$ А, $I_{КБК} = 10^{-13}$ А, включен в схему на рис. 3.1.

Определить напряжение коллектор — эмиттер $U_{кэ}$, а также токи $I_э$, $I_к$, $I_б$.

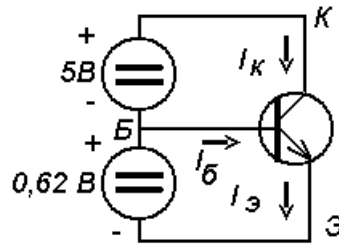


Рисунок 3.1– Схема включения транзистора

Решение. Напряжение коллектор — эмиттер найдем из выражения

$$U_{ЭБ} + U_{БК} + U_{КЭ} = 0$$

откуда

$$U_{КЭ} = 5 + 0.62 = 5.62 \text{ В.}$$

Определим ток коллектора:

$$I_K = \alpha I_{ЭБК}(e^{eU_{БЭ}/(kT)} - 1) - I_{КБК}(e^{eU_{БК}/(kT)} - 1)$$

Заметим, что в последнем слагаемом членом с экспоненциальным множителем можно пренебречь из-за большого отрицательного $U_{БК}$.

Подставляя значения величин из условия задачи, получаем:

$$I_K = 0.995 \cdot 10^{-14} (e^{0.62/0.026} - 1) - 10^{-13} (e^{-5/0.026} - 1) = 2.3 \cdot 10^{-4} \text{ А.}$$

Определяем ток эмиттера по формуле

$$I_Э = +I_{ЭБК}(e^{eU_{БЭ}/(kT)} - 1) - \alpha_1 I_{КБК}(e^{eU_{БК}/(kT)} - 1) = 10^{-14} (2.3 \cdot 10^{10}) - 10^{-14} = +2.3 \cdot 10^{-4} \text{ А}$$

Ток базы

$$I_Б = -I_K + I_Э = 0$$

В действительности ток базы не равен нулю. Неверный результат получили из-за приблизительного подсчета тока коллектора:

$$I_K = 0.995 \cdot 2.3 \cdot 10^{-14} \cdot 10^{10} = 2.3 \cdot 10^{-4} \text{ А.}$$

Следовательно,

$$I_Б = -0.995 \cdot 2.3 \cdot 10^{-4} + 2.3 \cdot 10^{-4} = 1.15 \cdot 10^{-6} \text{ А.}$$

Задача 3. Устройство содержит транзистор $p-n-p$, который включен в схему с общей базой. Покажите, что дифференциальное сопротивление эмиттера можно приближенно вычислить по формуле

$$r_э \approx kT/(eI_э),$$

где $I_э$ — ток эмиттера. Вычислить $r_э$ при $T = 300$ К, если $I_э = 2$ мА.

Решение. Поскольку на эмиттерный переход подано прямое напряжение, то ток эмиттера может быть определен следующим образом:

$$I_3 \approx I_{ЭБК} e^{eU_{ЭБ}/(kT)}$$

где $I_{ЭБК}$ — обратный ток.

Тогда

$$r_3 = \left. \frac{dU_{ЭБ}}{dI_3} \right|_{U_{КБ}=\text{const}} = \frac{kT}{eI_3}$$

и

$$r_3 \approx kT/(eI_3).$$

При $I_3 = 2 \text{ мА}$ и $T = 300 \text{ К}$

$$r_3 = 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 / (1.6 \cdot 10^{-19} - 2 \cdot 10^{-3}) = 13 \text{ Ом}.$$

Задача 4. Устройство содержит сплавной транзистор типа *p-n-p*, который включен в схему, изображенную на рис. 3.2. Определить коллекторный ток, если известно, что коэффициент передачи тока эмиттера транзистора $\alpha = 0.98$ и обратный ток коллекторного перехода $I_{КБО} = 10 \text{ мкА}$.

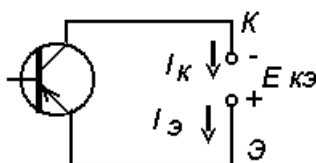


Рисунок 3.2 – Схема включения транзистора

Решение. Воспользуемся известным соотношением для токов транзистора в активном режиме:

$I_K = \alpha I_3 + I_{КБО}$. Поскольку цепь базы разорвана, то $I_K = I_3$. Исключив из уравнения I_3 , получим

$$I_K = \alpha I_K + I_{КБО} \text{ или } I_K (1 - \alpha) = I_{КБО},$$

откуда

$$I_K = I_{КБО} / (1 - \alpha) = I_{КБО} (1 + \alpha)$$

Этот ток обозначается символом $I_{КЭ0}$ и называется обратным током коллектор — эмиттер при разомкнутом выводе базы.

Подставляя числовые значения, данные в условии задачи, получаем:

$$I_{КЭ0} = 10 / (1 - 0.98) = 500 \text{ мкА}.$$

Этот ток в $1 + \beta$ раз больше обратного тока коллектора $I_{КБО}$. Большое значение тока $I_{КЭ0}$ снижает устойчивость работы транзистора в схеме с общим эмиттером и может привести к тепловому пробую, поэтому при эксплуатации транзисторов не допускается отключение или разрыв цепи базы при наличии напряжения на других электродах.

В этой задаче, кроме того, дан очень простой и точный способ измерения коэффициента передачи тока эмиттера α . Если вначале измерить обратный ток коллекторного перехода $I_{КБО}$ (включая батарею между коллектором и базой), а затем измерить коллекторный ток, используя схему, изображенную на рис. 3.2, то можно непосредственно определить $1 - \alpha$.

Задача 5. Устройство содержит плоскостной транзистор типа $p-n-p$, который включен в схему рисунок 3.2. Требуется определить коллекторный ток, если известно, что коэффициент передачи тока эмиттера транзистора $\alpha = 0,98$ и тепловой ток коллектора $I_{k0} = 10$ мкА.

Решение. Воспользуемся известным соотношением для токов транзистора в активном режиме: $I_k = \alpha I_{\epsilon} + I_{k0}$. Поскольку цепь базы разорвана, то $I_k = I_{\epsilon}$. Исключив из уравнения I_{ϵ} , получим $I_k = \alpha I_k + I_{k0}$; $I_k(1 - \alpha) = I_{k0}$, откуда $I_k = I_{k0} / (1 - \alpha) = I_{k0}(1 + \beta)$. Этот ток обозначается символом $I_{k \rightarrow 0}$ и называется сквозным начальным током коллектора.

Подставляя числовые величины, данные в условии задачи, получим $I_{k \rightarrow 0} = 10 / (1 - 0,98) = 500$ мкА. Этот ток в $(1 + \beta)$ раз больше теплового тока коллектора I_{k0} . Значительная величина тока $I_{k \rightarrow 0}$ снижает устойчивость работы транзистора в схеме с общим эмиттером и может привести к тепловому пробую. Поэтому при эксплуатации транзисторов не допускается отключение или разрыв цепи базы при наличии напряжения на других электродах.

3.2 Задачи для проработки темы

Задача 3.1. Транзистор типа $n-p-n$ включен в схему с общей базой. Напряжение $U_{\epsilon\delta} = -0,5$ В, напряжение $U_{к\delta} = 12$ В. Определить напряжение коллектор-эмиттер. Ответ: - 12,5 В.

Задача 3.2. Транзистор типа $p-n-p$ включен в схему с общим эмиттером. Напряжение $U_{\epsilon\delta} = -0,8$ В, напряжение $U_{к\epsilon} = -10$ В. Определить напряжение коллектор- база. Ответ: - 9,2 В.

4 Полевые транзисторы

4.1 Примеры решения задач по теме

Задача 1. В усилителе, показанном на рис. 4.1, при $|U_{\text{зи}}| = 2$ В ток стока $I_c = 1$ мА. Определить:

а) сопротивление резистора $R_{\text{и}}$, если падением напряжения $I_3 R_3$ пренебречь; б) E_c , если $R_{\text{и}} = 10$ кОм, $U_{\text{си}} = 4$ В.

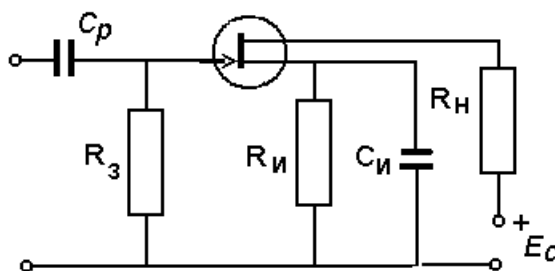


Рисунок 4.1 – Схема с полевым транзистором

Решение:

$$а) R_{и} = |U_{зи}| / I_c = 2,0 / (1 \cdot 10^{-2}) = 2 \text{ кОм};$$

$$б) E_c = I_c R_H + U_{си} + I_c R_{и} = 10 + 4 + 2 = 16 \text{ В}.$$

Задача 2. В усилительном каскаде с общим истоком сопротивление нагрузки $R_H = 20 \text{ кОм}$ (рис 3.1). Эффективное входное сопротивление полевого транзистора 20 кОм , рабочая крутизна $S = 2 \text{ мА/В}$. Определить коэффициент усиления каскада.

Решение:

Результирующее сопротивление нагрузки

$$Z_H = \frac{1}{1/20 + 1/20} = 10 \text{ кОм}$$

Коэффициент усиления каскада

$$K_u = SZ_H = 20 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^3 = 20$$

Ответ: 20

4.2 Задачи для проработки темы

Задача 4.1. Устройство с полевым транзистором имеет удельную проводимость канала n -типа полевого транзистора $\delta = 20,9 \text{ См/м}$ и ширина канала $\omega = 6 \text{ мкм}$ при напряжении затвор-исток, равном нулю. Найти напряжение отсечки $U_{отс}$, считая, что подвижность электронов $\mu_n = 0,13 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, а относительная диэлектрическая проницаемость кремния $\epsilon = 12$.

Задача 4.2. При напряжении затвора равном нулю, сопротивление сток-исток равно 50 Ом . При каком напряжении затвора сопротивление сток-исток станет равным 200 Ом .

5 СВЧ-устройства (СВЧ)

5.1 Примеры решения задач по теме

Задача 1. Усилитель должен обеспечить мощность в выходном резонаторе 4 кВт при мощности сигнала на входе 160 Вт . Сопротивление резонатора 2800 Ом . Напряжение источника питания 5 кВ . Амплитуда первой гармоники тока составляет 1 А . Вычислить коэффициент полезного действия и коэффициент усиления (в раз и децибелах) усилителя. Изобразить структурную схему усилителя и источника питания. На схеме указать направления передачи мощностей, упоминающихся в условии задачи.

Решение:

Усилительным устройством (усилителем) называется устройство, в нагрузку которого поступает усиленный по мощности входной сигнал. Эффект усиления сигнала по мощности возможен только в том случае, если имеется источник энергии, называемый источником питания, от которого

потребляется мощность постоянного тока P_0 . Эта мощность преобразуется в выходную мощность переменного тока $P_{\text{ВЫХ}}$. На преобразование мощности P_0 в $P_{\text{ВЫХ}}$ затрачивается мощность $P_{\text{ВХ}}$, поступающая от источника сигнала и называемая входной.

Основная задача усилителя СВЧ – обеспечить избирательность, усиление и чувствительность радиоприёмника. Поэтому необходимо, чтобы СВЧ-усилитель имел следующие параметры: низкие собственные шумы, высокое усиление, умеренную избирательность. Полоса частот сужается при использовании резонансных цепей и фильтров, а для снижения шумов используют специально разработанные для усилителей СВЧ-транзисторы. Для уменьшения нелинейных искажений и уменьшения коэффициента шума выбирают линейный режим работы усилителя.

Найдём выходную мощность сигнала, воспользовавшись формулой:

Мощность, потребляемая усилителем от источника питания, определяется как произведение постоянной составляющей тока I_0 , потребляемого усилителем, и напряжения источника питания U_0 :

$$P_0 = I_0 * U_0 = 5000 \text{ (Вт)}$$

Усилитель преобразует мощность P_0 в мощность усиливаемого сигнала. Мерой эффективности преобразования является коэффициент полезного действия усилителя:

$$\eta = (P_{\text{ВЫХ}} - P_{\text{ВХ}}) / P_0 = (4046 - 160) / 5000 = 0.777 = 77.7 \%$$

В числителе записана разность мощностей усиливаемого сигнала на выходе и на входе усилителя.

Одним из важнейших параметров усилителя является его коэффициент усиления, который количественно сравнивает уровни входного и выходного сигналов этого устройства.

В диапазоне СВЧ трудно измерить амплитуды напряжения или амплитуды тока, поэтому чаще всего используют коэффициент усиления по мощности. Он вычисляется по формуле:

$K_p = 10 * \lg(P_{\text{ВЫХ}} / P_{\text{ВХ}}) = 14.037 \text{ (дБ)}$, где $P_{\text{ВЫХ}}$ и $P_{\text{ВХ}}$ – выходная и входная мощности сигнала соответственно.

Коэффициент усиления в размах по мощности:

$K_p = P_{\text{ВЫХ}} / P_{\text{ВХ}} = 25.288$, следовательно выходная мощность сигнала больше входной приблизительно в 25 раз.

На рис 5.1 изображена структурная схема усилителя:

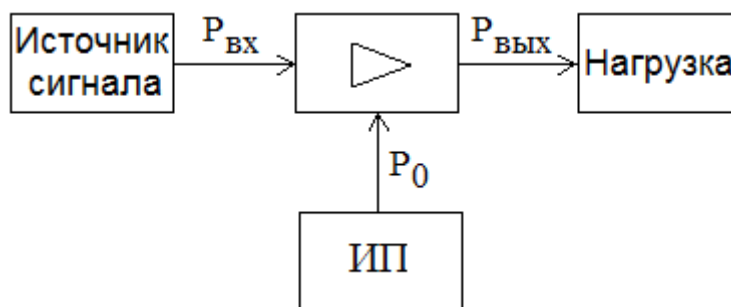


Рисунок 5.1 – Структурная схема усилителя

ИП – источник питания; Δ - Усилитель.

Ответ: $\eta = 77.7 \%$; $K_p = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}} = 25.3$ (раз); $K_p = 14$ (дБ).

Задача 2. Устройство представляет собой полосковую линию с волновым сопротивлением $Z_0 = 50$ Ом, которая присоединена параллельно полупроводниковому диоду, входная ёмкость которого равна 0,2 пФ. Определить сопротивление параллельного соединения на волне 10 см при длине линии: 5; 4; 3; 2; 1; 0,5 см.

Решение:

Полосковая линия — линия передачи СВЧ, представляет собой радиоволновод для передачи электромагнитных волн в воздушной или иной диэлектрической среде вдоль двух или нескольких проводников, имеющих форму тонких полосок и пластин.

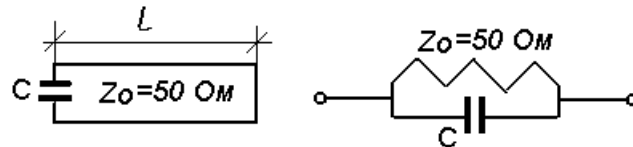


Рисунок 5.2 – Полосковая симметричная линия и схема ее параллельного соединения с полупроводниковым диодом

Волновое сопротивление — характеристика среды распространения волнового возмущения. Волновое сопротивление линий передачи — это отношение амплитуды напряжения бегущей волны к амплитуде силы тока бегущей волны в линии, по которой распространяется электромагнитная волна. Волновое сопротивление однозначно зависит от таких параметров линии, как ёмкость, диэлектрическая проницаемость материала проводника (зависит от частоты работы генератора сигнала), индуктивности и сопротивления на единицу длины. Волновое сопротивление среды — это отношение амплитуд электрического и магнитного полей электромагнитных волн, распространяющихся в среде.

Найдём сопротивление полосковой линии на волне 10 см при заданной длине линии:

$$Z_{\text{вх}} = j \cdot Z_0 \cdot \operatorname{tg} \left(2 \cdot \pi \cdot \frac{l}{\lambda} \right)$$

При длине линии $l = 5$ см:

$$Z_{\text{вх}} = j \cdot 50 \cdot \operatorname{tg} \left(2 \cdot \pi \cdot \frac{5}{10} \right) = -6.123 \cdot j \cdot 10^{-15} (\text{Ом})$$

Если $l = 4$ см, то:

$$Z_{\text{вх}} = j \cdot 50 \cdot \operatorname{tg} \left(2 \cdot \pi \cdot \frac{4}{10} \right) = -36.327 \cdot j$$

Если $l = 3$ см, то:

$$Z_{\text{вх}} = j \cdot 50 \cdot \operatorname{tg} \left(2 \cdot \pi \cdot \frac{3}{10} \right) = -153.884 \cdot j (\text{Ом})$$

Если $l = 2$ см, то:

$$Z_{\text{вх}} = j \cdot 50 \cdot \operatorname{tg} \left(2 \cdot \pi \cdot \frac{2}{10} \right) = 153.884 \cdot j \text{ Ом}$$

Если $l = 1$ см, то

$$Z_{\text{вх}} = j \cdot 50 \cdot \operatorname{tg} \left(2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{10} \right) = 36.327 \cdot j \text{ (Ом)}$$

Если $l = 0,5$ см, то:

$$Z_{\text{вх}} = j \cdot 50 \cdot \operatorname{tg} \left(2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{20} \right) = 16.246 \cdot j \text{ (Ом)}$$

Найдём емкостное сопротивление полупроводникового диода:

$$Z_c = \frac{c \cdot 2 \cdot \pi}{\omega}$$

Вычислим сопротивление параллельного соединения полосковой линии с полупроводниковым диодом:

$$Z = \frac{Z_c \cdot Z_{\text{вх}}}{Z_c + Z_{\text{вх}}}$$

Если $l = 5$ см, то $Z = -6.123 \cdot j \cdot 10^{-15}$ (Ом)

Если $l = 4$ см, то $Z = 0.05 - 36.327 \cdot j$ (Ом)

Если $l = 3$ см, то $Z = 0.893 - 153.879 \cdot j$ (Ом)

Если $l = 2$ см, то $Z = 0.893 + 153.879 \cdot j$ (Ом)

Если $l = 1$ см, то $Z = 0.5 + 36.327 \cdot j$ (Ом)

Если $l = 0.5$ см, то $Z = 9.95 \cdot 10^{-3} + 16.246 \cdot j$ (Ом)

5.2 Задачи для проработки темы

Задача 5.1. Устройство содержит германиевый транзистор типа $n-p-n$, в котором база имеет ширину 0,025 мм. Определить каким частотам переменного напряжения соответствуют времена пролета $3,1 \times 10^{-8}$ сек; б) $6,38 \times 10^{-8}$ сек

Ответ: 32,4 МГц, 15,7 МГц

Задача 5.2. Устройство содержит кремниевый транзистор типа $n-p-n$, в котором база имеет ширину 0,05 мм. Определить какой частоте переменного напряжения соответствует время пролета $8,1 \times 10^{-8}$ сек. Ответ: 10 МГц

6 Фотоприемные устройства

6.1 Основные понятия

Чувствительность фотоприемников (ФП) – определяется тем, насколько сильно изменяются его характеристики при облучении светом:

а) токовая чувствительность – это:

$$S_i = \Delta I_{\phi} / \Delta \Phi,$$

где $\Delta\Phi$ [Вт · лм] - изменение потока излучения, падающего на прибор;

б) вольтовая чувствительность – это:

$$S_v = U_\Phi / \Phi.$$

Чувствительность зависит от G (G – скорость генерации пар).

Квантовый выход внутреннего фотоэффекта. η_1 - определяет, сколько неравновесных носителей (пар), созданы каждым поглощенным фотоном.

Определение скорости генерации пар G . Пусть на единичную поверхность приемника по направлению $x \perp$ этой поверхности, падает поток $\Phi_1(x)$ (плотность потока излучения). Зная, что $-d\Phi_1(x) = \alpha\Phi_1(x)dx$, получим, что поглощаемая энергия в расчете на 1 см^3 составляет:

$$-\frac{d\Phi_1}{dx} = \alpha\Phi_1.$$

Число Q_1 фотонов, поглощенных за 1с в 1 см^3 на глубине x таково:

$$Q_1 = \frac{\alpha\Phi_1}{h\nu}.$$

Число неравновесных носителей, возникающих в 1с в 1 см^3 (скорость образования носителей):

$$G(x) = \eta_1 Q_1(x) = \eta_1 \frac{\alpha\Phi_1}{h\nu}.$$

В области собственного поглощения $\eta_1 = 1$, а $Q_1 \sim \frac{1}{\nu}$, поэтому при $\Phi_1 = \text{const}$ скорость генерации G уменьшается обратно пропорционально частоте, чем больше ν , тем меньше G . У фотоприемника существует зависимость

$I_\Phi = f(G)$. В лавинных фотодиодах, фоторезисторах, фототранзисторах коэффициент усиления, зависит от E :

$$I_\Phi = f[G(x) \cdot K_{yc}(E)], \quad K_{yc}(E)$$

Фотодиоды инерционны. Инерционность характеризуется постоянной времени нарастания и спада фототока. Фототок уменьшается по закону:

$$I_\Phi = I_M \exp(-t/\tau_2),$$

где τ_2 - постоянная времени нарастания.

6.2 Примеры решения задач по теме

Задача 1. Устройство собрано так, что свет падает на поверхность фотоэлемента, активированного натрием, работа выхода которого равна 2,11 эВ. Найдите максимальные скорости всех фотоэлектронов, если длина волны падающего света принимает указанные выше значения.

Решение:

Подставив в формулу $E = h \cdot \nu = hc/\lambda = 1,24/\lambda$ значения, получим:

а) $1,24/0,33 = 3,76$ эВ;

б) $1,24/0,589 = 2,11$ эВ, $1,24/0,25 = 4,96$ эВ;

в) $1,24/0,644 = 1,93$ эВ.

Скорости фотоэлектронов, обладающих наибольшей энергией, определяется из уравнения Эйнштейна

$$(1/2)m \cdot v_{\max}^2 = h\nu - \phi,$$

где ϕ - фотоэлектрическая работа выхода данного материала, а $h\nu$ -энергия падающего излучения.

При освещении красным светом электроны испускаться не будут.

На длине λ желтого света энергии равны (хотя электроны имеют достаточную энергию выхода для преодоления потенциального барьера, но они остаются на поверхности).

В ультрафиолете электроны эмигрируют с максимальными скоростями:
для $\lambda=0,33$ мкм

$$v_{\max} = \sqrt{2(h\nu - \phi)m} = \sqrt{2(3,76 - 2,11) \cdot 1,6^{-19} / 9,11 \cdot 10^{-31}} = 0,76 \cdot 10^6 \text{ м/с},$$

для $\lambda=0,25$ мкм

$$v_{\max}=1,0 \cdot 10^6 \text{ м/с} \quad v_{\max}=1,0 \cdot 10^6 \text{ м/с}.$$

Пороговая чувствительность – это уровень светового потока $\Phi_{\text{п}}$, когда сигнал равен шуму, т. е. $\bar{I}_{\phi}^2 = \Delta \bar{I}^2$. Т. к. $\sqrt{\Delta \bar{I}^2}$ и $\Phi_{\text{п}}$ могут зависеть от площади S приемника и полосы Δf , то

$$\Phi_n^* = \frac{\Phi_n}{\sqrt{S \cdot \Delta f}},$$

где Φ^* - приведенный пороговый ток.

Задача 2. Устройство имеет фотодиод с работой выхода 2,08 эВ и спектральной чувствительностью 20 мкА/пм при освещении его $\lambda=0,546$ мкм. Считая, что световой поток 0,625 мкм на этой λ эквивалентен 1Вт, вычислить:

- пороговую частоту,
- запирающий потенциал, при котором фототок равен нулю,
- квантовый выход.

Решение.

Работа выхода – это разница между падающей энергией излучения и энергией, характеризующей эмиссионные свойства материала. Квантовый выход (Q) – это есть отношение числа испускаемых электронов к числу падающих. Квантовый выход

$$Q = n_e / n_p = (I/l) / (P/h\nu) = I \cdot h\nu / lP,$$

где n_e – число фотонов, падающих на фотокатод в 1с, а излучение с частотой ν несет мощность P . Спектральная чувствительность $S = I/P$; $S/Q = l/h\nu$.

Пороговая частота находится из условия $\phi = h\nu$ где $\nu = \phi/h = 502 \cdot 10^{12}$ Гц, а пороговая длина волны $\lambda = c/F = 5,98$ Нм, $V_s = h\nu - \phi = 1,24/0,546 = 2,27$ эВ.

Запирающий потенциал, при котором фототок уменьшается до нуля, равен $V_s = h\nu - \phi/l = 2,27 - 2,08 = 0,19$ В.

Квантовый выход $Q=I_{hv}/IP=0,03$.

6.3 Задачи для проработки темы

Задача 6.1. Нарисуйте графики зависимости фототока от светового потока для трех различных сопротивлений резисторов нагрузки $R_n = 1, 10$ и 20 МОм, если напряжение источника $E_a=200$ В.

Задача 6.2. Приведите схему устройства для подключения фотоэлектронного умножителя. Определить число каскадов фотоэлектронного умножителя для получения выходного тока 2 мА, если ток эмиссии фотокатода $0,01$ мкА, а коэффициент вторичной эмиссии $\sigma=6$.

Ответ: 7.

Задача 6.3. Приведите схему устройства фотоэлектронного умножителя. Определите коэффициент усиления фототока в фотоэлектронном умножителе, если известно, что число эмиттеров в приборе равно 6, коэффициент вторичной эмиссии материала эмиттера $\sigma = 4$.

Ответ: 4096.

Задача 6.4. Нарисуйте и объясните вольт-амперные и световые характеристики фотодиода в фотодиодном режиме. Приведите схему включения фотодиода, работающего в этом режиме.

Задача 6.5. Нарисуйте и объясните характеристики фотодиода в вентильном режиме для нескольких световых потоков. Укажите на характеристиках режимы холостого хода и короткого замыкания. Приведите схему включения фотодиода, работающего в этом режиме.

Контрольные вопросы по дисциплине «Твердотельные устройства»

1. Приведите схему включения диода в прямом и обратном включении.
2. Вольт-амперная характеристика диода?
3. Влияние температуры на характеристики диода?
4. Каковы особенности схем, содержащих транзисторы при включении с общим эмиттером.
5. Укажите особенности устройств и схем, содержащих транзисторы при включении с общим коллектором
6. Каковы особенности устройств со схемами, содержащими транзисторы при включении с общей базой
7. Достоинства и недостатки устройств с полевыми транзисторами
8. Температурные особенности работы устройств с полупроводниковыми приборами

9. Шумы в схемах, содержащих полупроводниковые приборы
10. Работа транзисторных устройств в области высоких частот
11. Особенности монтажа высокочастотных устройств на транзисторах.
12. Устройства на полосковых линиях
13. Особенности устройств, содержащих МДП транзисторы
14. Анализ траектории электрона, влетающего в осесимметричное магнитное поле под углом 90 градусов.
15. Работа стабилитрона в устройстве стабилизации
16. Устройства регулировки напряжения на тиристорах
17. Устройства на симисторах
18. Устройства на динисторах
19. Устройства с фотоэлементами.
20. Работа фотодиодов в устройствах СВЧ
21. Устройства с фотоумножителями.

Учебное пособие

Орликов Л.Н.

Твердотельные устройства
Методические указания по самостоятельной работе

Усл. печ. л. Препринт
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники
634050, г.Томск, пр.Ленина, 40