МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
_____ Т.Ю. Гаченева
«_2_» _11_ 2026 г.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Задания для практических занятий
по дисциплине «Электроника»

Курск 2026

УДК 621.38

Составители: Карпенко Н.Н., Гайдаш Н.М., Поданов В.О.

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент *И.В. Ворначева*

Моделирование и применение полупроводниковых приборов: методические указания к проведению практических занятий по дисциплине «Электроника»/ Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Карпенко Н.Н., Гайдаш Н.М., Поданов В.О. Курск, 2026. 17с.: Библиогр.: с.17.

Излагаются задания и методические указания к проведению практических занятий по курсу «Электроника». Целью занятий являются закрепление полученных теоретических знаний и приобретение практических навыков по анализу характеристик и параметров полупроводниковых приборов, а также по расчету электронных схем.

Методические указания предназначены для очной и заочной форм обучения

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать. Формат 60x84 1/16.
Усл. печ. л.0,9.Уч.-изд.л.0,9. Тираж 100 экз. Заказ. Бесплатно. 1841
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

1. ЦЕЛЬ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Цель практических занятий по курсу «Электроника» – закрепить полученные теоретические знания по моделированию полупроводниковых приборов и по расчету некоторых электронных устройств.

Задачи, решаемые на практических занятиях, помогают правильно выбрать полупроводниковые приборы и схемные решения наиболее распространенных устройств, произвести инженерный расчет и оценить технико-экономическую эффективность решений.

2. ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

Задание № 1. Проводимость чистых и примесных полупроводников.

Объяснить проводимость чистых полупроводников (Ge, Si), исходя из их энергетических диаграмм, характеризующих распределение по энергиям электронов отдельного атома и группы атомов, образующих кристаллическую решетку.

Описать понятие «дырки» и охарактеризовать движение свободных электронов и дырок в соответствующих зонах с подчеркиванием их особенностей.

Определить понятия термогенерации и рекомбинации пар носителей.

Объяснить зависимость числа носителей от вида материала и температуры, используя выражение:

$$n_i = p_i = Ae^{-\frac{\Delta W_З}{2kT}}, \quad (1)$$

где A - постоянный коэффициент;
$\Delta W_З$ - ширина запрещенной зоны в эВ;
k - постоянная Больцмана;

T - температура по Кельвину.

Виды движения носителей заряда, их характер в чистом полупроводнике. Плотность дрейфового тока исходя из выражения:

$$j_{др} = j_{др.n} + j_{др.p} = q\, n_i\, (\mu_n + \mu_p)\, E, \qquad (2)$$

где q - заряд электрона, μ_n, μ_p - подвижность электронов и дырок соответственно;

Выражение удельной электропроводности, исходя из закона Ома

$$j_{др} = \delta E, \qquad (3)$$

где δ – удельная электропроводность.

Исходя из (1), (2) и (3) получить выражение для δ и дать объяснение зависимости δ от температуры.

Подтвердить правильность сделанного вывода с помощью статистики Ферми-Дирака.

$$P(W) = \frac{1}{e^{\frac{W - W_F}{kT}} + 1} \qquad (4)$$

где P(W)- вероятность заполнения энергетического уровня W; W_F – энергия уровня Ферми.

Объяснить проводимость примесных полупроводников,

Указать материалы примесей, которые определяют донорную или акцепторную проводимость и смещение уровня Ферми. Показать, как зависит удельная проводимость примесных полупроводников от температуры, используя при этом выражение:

$$\delta_n \cong qN_d\mu_n \qquad (5)$$

$$, \delta_p \cong qN_a\mu_p$$

где N_D и N_A - концентрации донорной и акцепторной примесей соответственно.

Описать диффузионную плотность тока примесных полупроводников:

$$j_{\text{диф.п}} = qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$j_{\text{диф.р}} = qD_p \frac{dp}{dx} \qquad (6)$$

где D_n и D_p - коэффициенты диффузии электронов и дырок, dn/dx и dp/dx - изменение концентрации (градиент) электронов и дырок при переходе от слоя к слою.
D_n и D_p зависят от температуры, т.к.

$$D = \varphi_T \mu ,$$

где φ_T = kT /q - тепловой потенциал в В.

Объяснить зависимость плотности длины.диффузионного тока от температуры. Определить понятие диффузионной длины.

Задание № 2. Электронно-дырочный (р-п) переход как основной элемент большинства полупроводниковых приборов.

Объяснить физические процессы в р-п переходе в отсутствии внешнего напряжения при условии неодинаковости концентраций акцепторной N_a и донорной N_d примесей, приводящие к образованию контактной разности потенциалов (потенциального барьера φ_0)

$$\varphi_0 = \varphi_T \ln \frac{P_p}{P_n} = \varphi_T \ln \frac{n_n}{n_p} , \qquad (7)$$

где p_p и n_n – концентрации основных носителей в слоях р и n, p_n и n_p - концентрации неосновных носителей в слоях р и n.

Показать, что выражение (7) может быть переписано в виде:

$$\varphi_0 = \varphi_T \ln \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2}, \qquad (8)$$

где N_a - концентрация акцепторной примеси, N_d - концентрация донорной примеси, $n_i = p_i$- концентрации электронов и дырок в чистом полупроводнике.

Используя выражения (7) и (8), проанализировать зависимость высоты потенциального барьера φ_0 от температуры. Сравнить высоты потенциальных барьеров для германия и кремния при условии, что ширина запрещенной зоны германия ΔW_3= 0,72 эВ, а кремния 1,12 эВ.

Объяснить физические процессы в p-n переходе при прямом и обратном смещении за счет включения внешнего источника напряжения в том или ином направлении, отметить изменение граничных концентраций неосновных носителей и, как следствие, протекание тока в прямом и обратном направлениях в соответствии с выражениями:

$$I_a = I_s\left(e^{\frac{U_a}{\varphi_T}} - 1\right) \qquad (9)$$

$$I_B = -I_s\left(1 - e^{\frac{-U_B}{\varphi_T}}\right) \qquad (10)$$

где Is - ток насыщения, U_a- напряжение прямого смещения, U_B- напряжение обратного смещения.

Построить теоретическую и практическую вольтамперную характеристику (ВАХ) p-n перехода, объяснить различия, дать понятие пробоя перехода, перечислить его разновидности.

Дать определение полупроводникового диода, перечислить основные типы диодов, уметь изобразить их ВАХ, определить их назначение и особенности.

2.4. Задание № 3. Биполярные транзисторы.

Опишите назначение, устройство, принцип действия биполярных транзисторов.

Определите физические составляющие токов электродов, коэффициенты инжекции, переноса и передачи, а также связь между ними.

Определите связь токов электродов в соответствии с первым законом Кирхгофа.

Перечислите схемы включения биполярных транзисторов.

Напишите соотношения токов выходного и входного электродов для схем с ОБ, ОЭ и ОК.

Установите соотношения переменных составляющих токов выходного и входного электродов.

Для ответов на поставленные вопросы необходимо привести диаграмму составляющих токов в транзисторе и разобраться в соотношениях:

$$\left.\begin{array}{c} I_{\text{Э}} = I_{\text{ЭР}} + I_{\text{Э}n},\ \gamma = \frac{I_{\text{ЭР}}}{I_{\text{Э}}} \\ I_{\text{ЭР}} = I_{\text{КР}} + I_{\text{БР}},\ \delta = \frac{I_{\text{КР}}}{I_{\text{ЭР}}} \\ \alpha_0 = \frac{I_{\text{КР}}}{I_{\text{Э}}} = \delta \cdot \gamma \end{array}\right\} \quad (11)$$

Далее:

$$\left.\begin{array}{c} I_{\text{К}} = I_{\text{КР}} + I_{\text{КО}} \\ I_{\text{Э}} = I_{\text{ЭР}} + I_{\text{Э}n} \\ I_{\text{Б}} = I_{\text{Э}n} - I_{\text{КО}} + I_{\text{БР}} \end{array}\right\} \quad (12)$$

Затем: (13)

$$\left.\begin{array}{l} I_{Э} = I_{K} + I_{Б}; \\ I_{K} = \alpha_0 \cdot I_{Э} + I_{K0}; \\ I_{Б} = (1-\alpha_0) \cdot I_{Э} - I_{K0}. \end{array}\right\}$$

Соотношения приведены для транзисторов p-n-p типа, объяснить – почему.

$$\left.\begin{aligned} I_K &= \alpha_0 \cdot I_Э + I_{K0}; \\ I_K &= \beta_0 \cdot I_Б + I^*_{K0} \\ I_Э &= (1+\beta_0) \cdot I_Б + I^*_{K0}. \end{aligned}\right\} \qquad (14)$$

Показать, как связаны коэффициенты α_0 и β_0 и как соотносятся токи I_{ko} и $I^*_{ko.}$

Задание № 4. Биполярные транзисторы.

Описать статические характеристики биполярных транзисторов, включенных по схеме с общей базой (ОБ) и общим эмиттером (ОЭ).

Для ответа на эти вопросы необходимо построить входные и выходные характеристики для указанных двух схем включения транзистора. На входных характеристиках отметить и объяснить изменения тока входного электрода при изменении напряжения в выходной цепи и изменение местоположения точки начала характеристик. На выходных характеристиках отметить и объяснить рост тока выходного электрода с ростом напряжения в выходной цепи и изменение местоположения точки, соответствующей началу этих характеристик.

Постройте схемы замещения транзистора в физических параметрах для включения с ОБ и ОЭ. Объяснить физический смысл элементов, входящих в схему; отметить их зависимость от режима покоя транзистора.

Опишите систему h-параметров транзисторов. Формализованная схема замещения рис.2.1. Объяснить смысл ее построения и целесообразность, а также физический смысл параметров формализованной схемы.

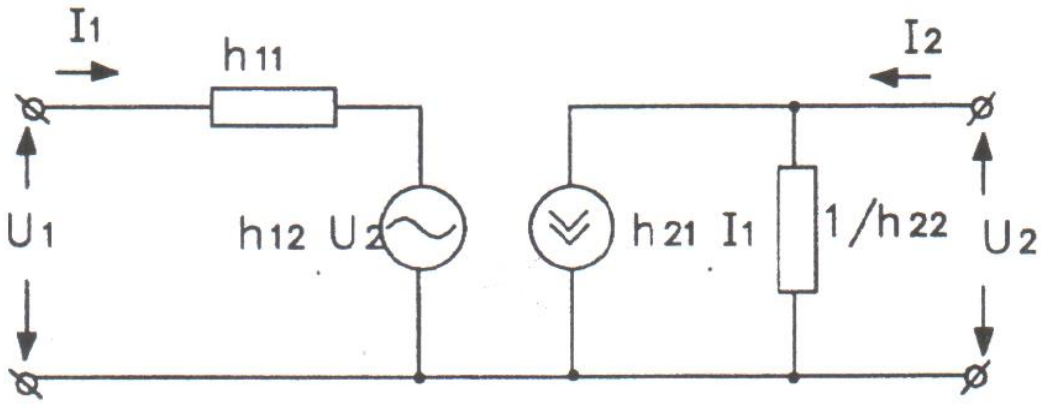


Рис. 1

Показать возможность определения h-параметров по статическим характеристикам транзистора.

Опишите частотные свойства транзистора.

Задание № 5. Униполярные (полевые транзисторы)

Опишите назначение, устройство, принцип действия униполярного транзистора.

Опишите принципиальные отличия полевых транзисторов от биполярных транзисторов.

Опишите полевой транзистор с управляющим p-n переходом.

Опишите полевые транзисторы с изолированным затвором с встроенным и индуцированным каналами проводимости. Опишите Статические характеристики и параметры различных типов транзисторов, режимы обеднения и обогащения.

Для ответа на эти вопросы необходимо детально разобраться в принципе действия и устройстве различных типов полевых транзисторов, построении статических характеристик и смысле отдельных параметров:

$$\left.\begin{aligned} S &= \frac{dI_C}{dU_{ЗИ}} /_{U_{СИ}=const} \\ R_i &= \frac{dU_{СИ}}{dI_C} /_{U_{ЗИ}=const} \\ \mu &= \frac{dU_{СИ}}{dU_{ЗИ}} /_{I_C=const} \end{aligned}\right\}$$

Опишите схемы включения полевых транзисторов с ОИ, О3 и ОС, их аналогию с включением биполярных транзисторов по схеме с ОЭ, ОБ и ОК.

Занятие № 6. Произведите расчет одиночного каскада усиления в системе h-параметров для случаев включения биполярного транзистора по схеме с ОБ, ОЭ и ОК.

Исходные данные

для схемы с ОЭ: $h_{11э}$= 350 Ом, $h_{21э}$= 12, $h_{12э}$= l,5·10^{-4},

$h_{22э}$= 12,5·10^{-6} См; $R_н$= $R_к$= 1 кОм, $R_г$= 500 Ом;

для схемы с ОБ: $h_{I1Б}$= 28 Ом, $h_{21Б}$= - 0,92, $h_{12Б}$= 2·10^{-4},

$h_{22Б}$= 1·10^{-6} См; $R_н$=$R_к$= 1 кОм, R1= 500 Ом

для схемы с ОК: $h_{11К}$= 350 Ом, $h_{21К}$= -12, $h_{12К}$ = l,

$h_{22К}$ = 12,5·10^{-6} См; $R_Н$=$R_э$= 1 кОм, $R_Г$= 500 Ом.

Для выполнения задания необходимо воспользоваться выражениями параметров усилителя в системе h-параметров транзистора:

$$\left.\begin{aligned}
K_i &= \frac{h_{21}}{1 + h_{22} \cdot R_H}, \\
R_{BX} &= \frac{h_{11} + \Delta h \cdot R_H}{1 + h_{22} \cdot R_H}, \\
K_U &= -\frac{h_{21} \cdot R_H}{h_{11} + \Delta h \cdot R_H}, \\
R_{ВЫХ} &= \frac{h_{11} + R_Г}{\Delta h + h_{22} \cdot R_Г}, \\
K_P &= K^2{}_U \cdot \frac{R_{BX}}{R_H} = K^2{}_i \cdot \frac{R_H}{R_{BX}} = K_i \cdot K_U, \\
\Delta h &= h_{11} \cdot h_{22} - h_{12} \cdot h_{21}
\end{aligned}\right\} \quad (16)$$

Оцените полученные данные, произведите их сравнительный анализ.

2.8. Занятие № 7. Произвести расчет каскада усиления с RC-связью, приведенного на рис. 2

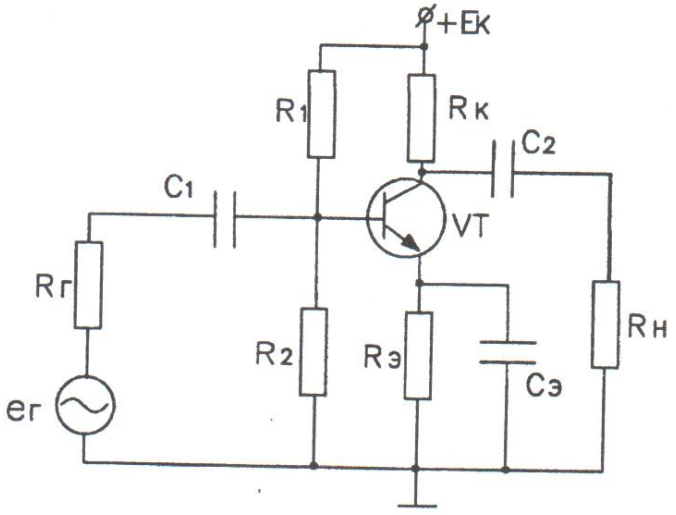


Рис. 2.

Дано: β=25; f_T=150 МГц; C_1 = 10 мкФ; Ск=7 пФ;

$r_Б$ = 50 Ом; C_2 =10 мкФ; R_K=200 Ом; $r_Э$ = 5 Ом;

Сэ = 50 мкФ; $R_г$=0,5 кОм; $R_Н$=1 кОм

Определить: 1) в области средних частот: $R_{вх}$, $R_{вых}$, K_i; K_U.

2) Полосу пропускания, т.е.: $f_В – f_Н$.

Для выполнения первого пункта необходимо воспользоваться нижеприведенными формулами:

$$\left.\begin{aligned} R_{ВХ} &\approx r_б + (1+\beta) r_Э \\ R_{ВЫХ} &\approx R_К \\ K_i &\approx \beta \cdot \frac{R_К \,//\, R_Н}{R_Н} \\ K_U &\approx \beta \cdot \frac{R_К \,//\, R_Н}{R_Г + R_{ВХ}} \end{aligned}\right\} \quad (17)$$

Для выполнения второго пункта задания необходимо воспользоваться выражениями для коэффициентов частотных искажений в области нижних и верхних частот:

$$M_Н = \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega_Н \cdot \tau_{НЭКВ}}\right)^2}\,, \quad (18)$$

где: $\frac{1}{\tau_{НЭКВ}} = \frac{1}{\tau_{Н1}} + \frac{1}{\tau_{Н2}} + \frac{1}{\tau_{НЭ}}$, $\tau_{н1} = C_1(R_Г + R_{ВХ})$

$\tau_{н2} = C_2(R_К + R_Н)$, $\tau_{НЭ} = C_Э(r_Э + \frac{R_Г + r_б}{1+\beta})$

$$M_В = \sqrt{1 + (\omega_В \cdot \tau_В)^2}\,, \quad (19)$$

где: $\tau_В = \frac{\tau_е}{1+\gamma_\delta \cdot \beta}$, $\tau_е = \tau_\beta + C_К(R_К || R_Н)(1+\beta)$

$$\tau_\beta = \frac{1+\beta}{2\pi f_T}\ ,\ \gamma_\delta = \frac{r_Э}{r_Э + r_б + R_Г}$$

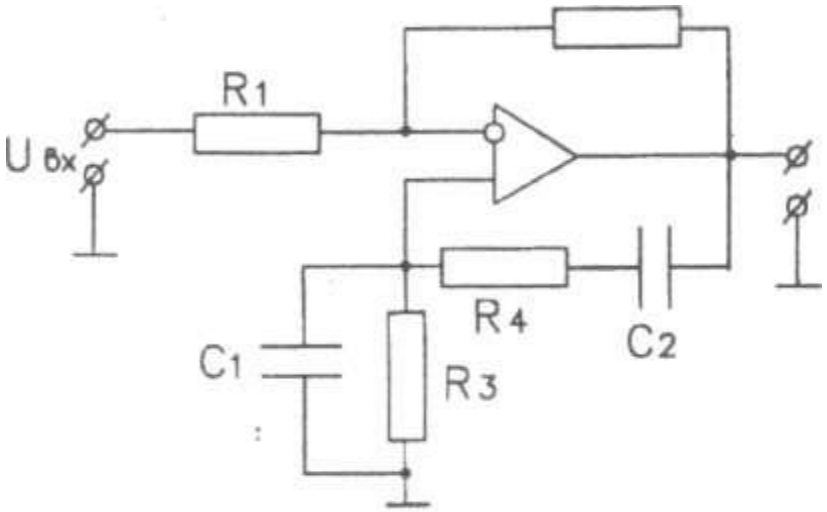


Рис. 3.

По известной полосе пропускания, верхней и нижней частотам определите среднюю частоту.

Задание № 8. Рассчитайте избирательный усилитель на ОУ с мостом Вина, схема которого показана на рис. 3.

Дано: Добротность усилителя $Q_{ус}$ =10; f_o=10 кГц; $U_{вых.m}$=8 В.
Определить параметры элементов схемы.

При решении поставленного задания необходимо выбрать ОУ с частотой единичного усиления f_T значительно больше f_0, с высокой стабильностью коэффициента усиления, что необходимо для предотвращения самовозбуждения и с высоким выходным напряжением. Подходящим по этим требованиям к примеру может служить ОУ типа 140УД6 с f_T= l МГц, $U_{вых.m}$= 11 В и внутренней частотной коррекцией.

Выражения, которые необходимо использовать при расчете, приведены ниже:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{m \cdot n}}, \qquad (20)$$

где $\mathrm{R}_4 = m \cdot R_3;\ \ C_2 = n \cdot C_1$

Коэффициент передачи цепи положительной обратной связи на этой частоте:

$$\gamma_0 = \frac{1}{1+m+n} \qquad (21)$$

Добротность моста Вина:

$$Q_{RC} = \gamma_0 \sqrt{m \cdot n} \qquad (22)$$

Очевидно, при $R_4 = R_3 = R$ и $C_2 = C_1 = C$, т.е. m= n= 1 имеем:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \qquad (23)$$

$$\gamma_0 = \frac{1}{3} = Q_{RC} = \frac{1}{3}$$

Коэффициент усиления усилителя по неинвертирующему входу с ПОС, как известно, равен:

$$K_{УС} = \frac{K''}{1-\gamma_0 \cdot K''} \qquad (24)$$

где $\mathrm{K''} = 1 + \frac{\mathrm{R}_2}{\mathrm{R}_1}$ - коэффициент усиления по неинвертирующему входу без ПОС; $K' = -\frac{R_2}{R_1}$ – коэффициент усиления по инвертирующему входу без ПОС;

$K''_{KP} = \frac{1}{\gamma_0}$ - критический коэффициент усиления,

т.к. у нас m= n= 1, то $\gamma_0 = \frac{1}{3}$, $K''_{KP} = 3$.

Фактическое значение К" должно находиться с учетом требований $Q_{ус}$= 10. Для этого используют выражение:

$$Q_{УС} = Q_{RC} \cdot \frac{K''_{KP}}{\Delta K''_{KP}} \qquad (25)$$

Из выражения (25) получаем:

$$\Delta K''_{КР} = K''_{KP} - K'' = \frac{Q_{RC} \cdot K''_{KP}}{Q_{УС}} \qquad (26)$$

или $K'' = K''_{KP} - \Delta K''_{KP}$

С учетом достаточно большого собственного коэффициента усиления ОУ можно считать, что коэффициент усиления по инвертирующему входу К' определяется соотношением R_2 и R_1 т.е.

$$\left|K'\right| = \frac{R_2}{R_1} = K'' - 1$$

Выбрав R_1 (к примеру 10 кОм), получаем R_2 = (К"-l) R_1.

Для минимизации ошибки ОУ за счет входных токов надо, чтобы выполнялось условие: R_1// R_2= R_3// R_4;

Если R_3= R_4= R, то R/2= R_1//R_2; откуда R_3= R_4= $2R_1R_2/(R_1+R_2)$.

Для обеспечения требуемого значения f_0 значение емкости C_1

и C_2 находим из (20), т.е.

$$C_1 = C_2 = \frac{1}{2\pi R f_0}$$

Амплитуда выходного сигнала обеспечивается выбором ОУ с $U_{вых.m}$= 11В.

3. ОФОРМЛЕНИЕ РАБОТ

Задания по практическим занятиям выполняются каждым обучающимся самостоятельно в отдельной тетради чернилами или пастой синего, фиолетового или черного цвета. Необходимые схемы, графики выполняются также чернилами или пастой черного цвета с помощью чертежных инструментов и с соблюдением государственных стандартов.

Числовые данные для проведения расчетов выдаются преподавателем непосредственно на занятиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Информационно-измерительная техника [Текст]: учебник / Г.Г. Раннев [и др]; под ред. Г. Г. Раннева - М.: Издательский центра «Академия», 2007.-512 с. ил.

2. Забродин Ю.С. Промышленная электроника [Текст]: учебник/ Ю.С. Забродин . – 2-е изд. стер. – М.: Альянс, 2008. – 496с.

3. Изъюрова Г. И., Королев Г. . и др. Расчет электронных схем - М.: Высш. шк., 1987.-335с

4. Горбачев Г. Н., Чаплыгин Е. Е. Промышленная электроника – М.: Энергоатомиздат., 1988. -320с