

1. Что такое эффективная плотность состояний электронов в зоне проводимости? Как она зависит от температуры и почему?
2. Концентрация собственных носителей заряда в кремнии при  $T = 300 \text{ K}$  равна  $1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Концентрация доноров  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Найдите значения концентраций основных и неосновных подвижных носителей заряда. Как они изменятся при повышении температуры на  $30 \text{ K}$ ?

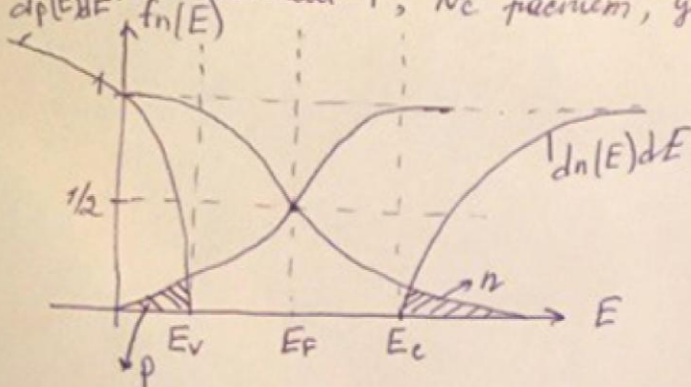
1. Что такое эффективная плотность состояний электронов в зоне проводимости? Как она зависит от температуры и почему?

$$N_c = \frac{2}{h^3} (2\pi m_n^* kT)^{3/2} - \text{эффективная пл-ть энергетических состояний в з.п.}$$

$$N_v = \frac{2}{h^3} (2\pi m_p^* kT)^{3/2} - \text{эффективная пл-ть энергетических состояний в валентной з.п.}$$

$$n = N_c e^{-\frac{E_c - E_F}{kT}} \quad p = N_v e^{-\frac{E_F - E_v}{kT}} \quad n_i = \sqrt{N_c N_v} e^{-\frac{\Delta E_g}{2kT}}$$

физич. смысл: концентрации разрешенных энергетических уровней в энергетической зоне кТ у дна зоны проводимости. с увеличением  $T$ ,  $N_c$  растет, увеличивается  $n$



$$T \uparrow, n \uparrow$$

как правило,  $N_c > n$ , такой  $n/n_i$  называется неэкстраполированным.

2) Концентрация собственных носителей заряда в кремнии при  $T = 300 \text{ K}$  равна  $1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Концентрация доноров  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Найдите значения концентраций основных и неосновных подвижных носителей заряда. Как они изменятся при повышении температуры на  $30 \text{ K}$ ?

$$n_i = 1,5 \cdot 10^{10}$$

$N_D = 10^{15}$   $n_n$  - основные носители;  $p_n$  - неосновные носители

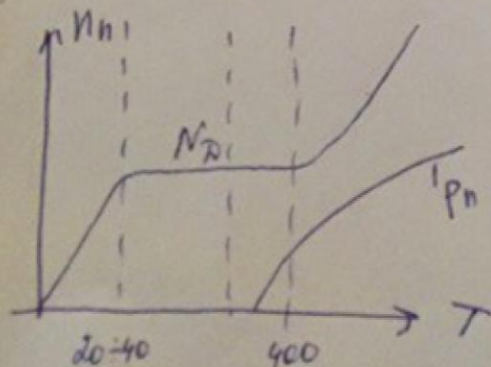
$$n_n = N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$$

$$n_n \cdot p_n = n_i^2 \Rightarrow p_n = \frac{n_i^2}{n_n} = \frac{(1,5 \cdot 10^{10})^2}{10^{15}} = 2,25 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$$

концентрация основных носителей заряда не изменяется. концентрация неосновных носителей при увеличении  $T$  возрастает по экспоненте в  $1,000303$  раз

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} e^{-\frac{\Delta E_g}{2kT}}$$

$$\frac{e^{-\frac{1}{T_0}}}{e^{-\frac{1}{T_0 + \Delta T}}} = \frac{e^{-\frac{1}{300}}}{e^{-\frac{1}{330}}} = \frac{0,99667222}{0,996974284} \Rightarrow \frac{1}{0,999697} = 1,000303$$





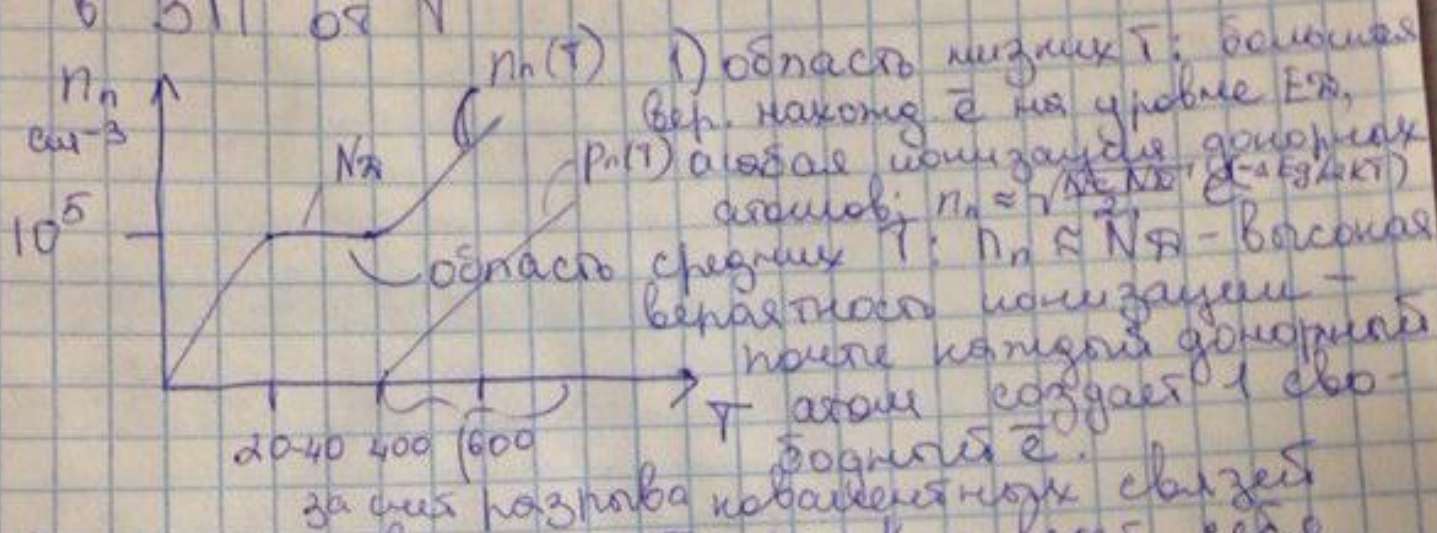
3. Изобразите и поясните зависимость концентрации электронов в зоне проводимости кремния, имеющего донорную примесь с концентрацией  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  от температуры в интервале  $0 < T < 600 \text{ К}$ . Как она изменится, если концентрация донорной примеси станет в 4 раза выше?

5. Дано:  $5L$

$N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$  - концентр. донорной примеси  
 $0 < T < 600 \text{ К}$

Нарисовать завис. конц. электронов  $n$

в ЗП от  $T$

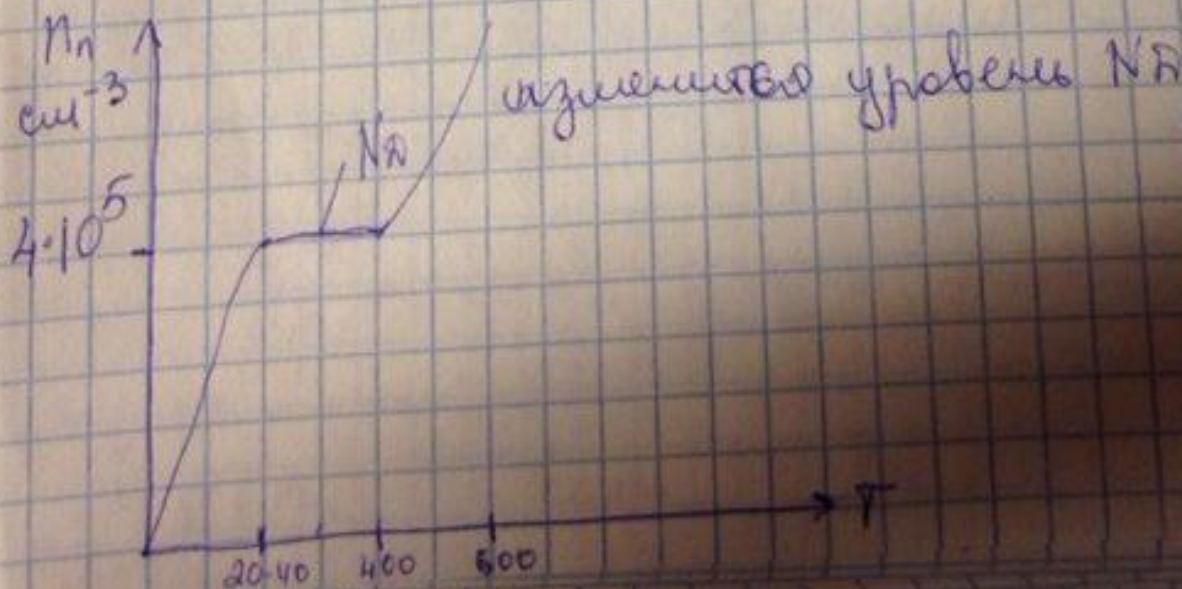


3) область высоких  $T$ :  $T > 400 \text{ К}$  - ведет себя как беспримесный

$$n = \sqrt{N_c \cdot N_v} e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

эфф. концентрация состояний

Если  $N_D$  увеличить в 4 раза то:





4. Изобразите и сравните зависимости концентраций электронов в зонах проводимости кремния и германия, имеющих донорную примесь с концентрацией  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ , от температуры в интервале  $0 < T < 600 \text{ К}$ .

5. Сравните удельные проводимости чистого германия и германия с донорной примесью. Концентрация примеси  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ , температура  $T = 300 \text{ К}$ , концентрация собственных носителей заряда  $2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , подвижность электронов  $\mu_n = 3900 \text{ см}^2/\text{Вс}$ , подвижность дырок  $\mu_p = 1900 \text{ см}^2/\text{Вс}$ . Как изменятся эти проводимости с повышением температуры на  $40 \text{ К}$ ?

4) Дано: Si и Ge (оба их валентные)

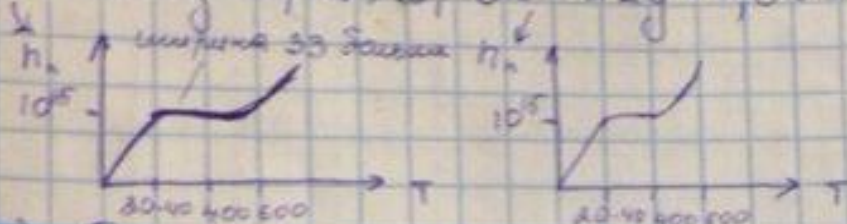
$$N_D = 10^{15} \text{ см}^{-3}$$

$$0 < T < 600 \text{ К}$$

$n_n$  от  $T$  для 2х веществ

есть в лекции

$$\text{Si} - \Delta E_g = 1,08 \text{ эВ}, \text{ Ge} - \Delta E_g = 0,66 \text{ эВ}$$



для высоких  $T > 400 \text{ К}$ :

$$n = \sqrt{N_c N_v} e^{\left(\frac{-\Delta E_g}{2kT}\right)}$$

5) Дано: 1) Чистый Ge

2) Ge с донорной примесью

$$N_D = 10^{16} \text{ см}^{-3} - \text{конц примеси}$$

$$T = 300$$

$$n_i = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3} - \text{конц. собств. носителей}$$

$$\mu_n = 3900 \text{ см}^2/\text{Вс} \text{ подвижность } e$$

$$\mu_p = 1900 \text{ см}^2/\text{Вс} \text{ подвижность дырок}$$

Сравните их  $\sigma$  - уд. проводимости

$$\sigma = e(n_n \mu_n + p_n \mu_p)$$

с примесью:

$$p_n = \frac{n_i^2}{N_D} \ll N_D \text{ можно пренебречь } (n_n = N_D)$$

Без примеси:

$$n = p = n_i$$

Если  $\uparrow T$   $\mu_n$  и  $\mu_p \downarrow$  (нач. 300 К)



6. Сравните удельные проводимости чистого кремния и кремния с донорной примесью. Концентрация примеси  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ , температура  $T=300 \text{ К}$ , концентрация собственных носителей заряда  $1,5 \cdot 10^{10} \text{ 1/см}^3$ , подвижность электронов  $\mu_n = 1500 \text{ см}^2/\text{В с}$ , подвижность дырок  $\mu_p = 600 \text{ см}^2/\text{В с}$ . Как изменятся эти проводимости с повышением температуры на  $40 \text{ К}$ ?

7. Условия справедливости закона Ома для однородных примесных полупроводников. При каких напряженностях электрическое поле в полупроводнике можно считать слабым? Как зависит от напряженности электрического поля дрейфовая скорость электронов в однородных полупроводниках?

6. Сравните удельные проводимости чистого кремния и кремния с донорной примесью. Концентрация примеси  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ , температура  $T=300 \text{ К}$ , концентрация собственных носителей заряда  $1,5 \cdot 10^{10} \text{ 1/см}^3$ , подвижность электронов  $\mu_n = 1500 \text{ см}^2/\text{В с}$ , подвижность дырок  $\mu_p = 600 \text{ см}^2/\text{В с}$ . Как изменятся эти проводимости с повышением температуры на  $40 \text{ К}$ ?

$N_D = 10^{16}$   
 $n_i = 1,5 \cdot 10^{10}$   
 $n_n = N_D$

удельная

$\sigma = e N_D \mu_n = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{16} \cdot 1500 = 2,40$

чистый n/n

$\sigma = n_i (\mu_n + \mu_p) e = 1,5 \cdot 10^{10} \cdot (1500 + 600) \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 0,00000504 = 5,04 \cdot 10^{-6}$

7. Условия справедливости закона Ома для однородных примесных полупроводников. При каких напряженностях электрическое поле в полупроводнике можно считать слабым? Как зависит от напряженности электрического поля дрейфовая скорость электронов в однородных полупроводниках?

$j_n = \sigma E_n$  - закон Ома для слабых эл. полей.

$\sigma$  - удельная проводимость n/n

Слабое эл. поле возникает при  $E_n = (100 - 500) \text{ В/см}$

$j_{др}$  - плотность дрейфового тока.

$\vec{j}_{др} = - \frac{e E_n}{m_n^*} \vec{\tau}$  ;  $\mu_n = \frac{e \vec{\tau}}{m_n^*}$

$\vec{v}_{др} = - \mu_n E_n$   $[\mu_n] = \left[ \frac{\vec{v}_{др}}{E_n} \right] = \frac{\text{см}^2}{\text{В.сек}}$

подвижность  $\bar{e}$  - это величина равная скорости дрейфа, обусловленной эл. полем с напряженностью  $E_n = 1 \text{ В/см}$

8) Уравнение непрерывности запишется для элементарных носителей заряда.

Пусть в н/н в равновесном состоянии носители заряда имеют конц.  $p_0$  и  $n_0$ .

Если в отр. участок объема н/н ввести доп.  $\bar{e}$  и дырки, то в  $t=0$

$$n = n_0 + \Delta n \quad ; \quad p = p_0 + \Delta p$$

$\downarrow$   $\downarrow$   
избыточные носители

тогда в н/н возникнет поле  $E$ , и избыточные заряды начнут покидать этот объем, из-за этого возникнет. Изменение их



концентрации определяется ур-ем непрерывности:

для дырок в n/n и типа:

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = G_p - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} - \frac{\partial}{\partial x} \left[ p_n \overset{\text{визир. движение}}{M_p E} - D_p \frac{\partial p_n}{\partial x} \right]$$

скорость  
генерации  
основных  
носителей

время жизни  
дырки

подвижность

и диффузия

отрицает способность

дырок к перемещению

за счет

диффуз.

для e-нов в n/n p типа:

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = G_n - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} - \frac{\partial}{\partial x} \left[ n_p M_n E + D_n \frac{\partial n_p}{\partial x} \right]$$

генерация

рекомбинация

решение ур-ий позволяет определить раз-

ность избыточных носит.  $\Delta p$  и  $\Delta n \gg$

если в n/n ввести равное кол-во  $\bar{e}$  и

дырок, то разность носит.  $\rightarrow 0$ , уменьшится

но екр. Вывод: в однородном n/n ур-е

непрерывности выражает условие сохране-

ния ~~массы~~ заряда. Как вывод - ур-е

электропроводности:  $n + N_A = p + N_D$



9. Поясните физический механизм возникновения контактной разности потенциалов на границе p- и n- областей полупроводника. Сравните величины контактных разностей потенциалов симметричных ступенчатых p-n переходов в германии и в кремнии, если в обоих случаях  $T = T_0 = 300 \text{ K}$ ,  $N_D = N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

9. Возникновение контактной разности потенциалов на границе p и n областей.

1) Si, 2) Ge

$$T = T_0 = 300 \text{ K}$$

$$N_D = N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$$

Найти:  $\varphi_k$  для 1) и 2)

$$\varphi_k = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2}$$

$$n_i^2 = N_c \cdot N_v \left( \frac{T}{T_0} \right)^3 e^{-\frac{\Delta E_g}{kT}}$$

разница

$$\text{у Si } \Delta E_g = 1,08$$

$$\text{у Ge } \Delta E_g = 0,66 \text{ эВ}$$

$$N_c = \frac{2}{h^3} (2\pi m_n^* kT_0)^{3/2}$$

$$N_v = \frac{2}{h^3} (2\pi m_p^* kT_0)^{3/2}$$

у Si  $n_i^2$  меньше за счет  $\Delta E_g$

значит дробь в логарифме больше

значит и  $\ln \dots$  больше  $\Rightarrow \varphi_k$  больше.

Физ. смысл: в p-n переходе в равновесии еось. (без внешнего поля) движутся

встречая 2 потока зарядов, компенсируют друг друга.

в p-n переходе создается раз-



10. Поясните физический механизм возникновения контактной разности потенциалов на границе р- и n- областей полупроводника. Сравните величины контактных разностей потенциалов асимметричных ступенчатых р - n переходов в германии и в кремнии, если в обоих случаях  $T = T_0 = 300 \text{ K}$ ,  $N_D = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

11. На какую величину изменится контактная разность потенциалов ступенчатого асимметричного р - n перехода в кремнии, если  $N_D = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , а температура изменяется от 230 К до 330 К ? Как изменится при этом ширина обедненного слоя ?

ность потенциалов -  $\varphi_k$  контактная разность потенциалов - барьер.

10) Контактная разность пот. для асимметричных ступенчатых р-n переходов в Si и Ge:

$$T = T_0 = 300 \text{ K}$$

$$N_D = 10^{19} \gg N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$$

> весь обедненный слой в р области;

$$\varphi_k = \frac{kT}{e} \ln \left( \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

Вроде бы (!) все как и в прошлом номере →

у Si:  $\varphi_k > \varphi_k$  у Ge.

11) Асимметр. р-n переход

Si:  $N_D = 10^{19}$   $N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3} \Rightarrow$  основные носители заряда -  $e^-$ -но.

T изм. от 230 до 330 К

$\varphi_k$  - ? ширина обедненного слоя (ОПЗ)?

$$l_n + l_p = l = \sqrt{\frac{2 \epsilon \epsilon_0 \varphi_k}{e} \left( \frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A} \right)}$$

↓  
т.е. там подвижные носители

$$\varphi_k = \dots$$



12. Изобразите распределения плотности заряда, напряженности электрического поля и потенциала в кремниевом асимметричном ступенчатом p-n переходе, если  $N_D = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $T = 300 \text{ К}$ .

12. Изобразите распределения плотности заряда, напряженности электрического поля и потенциала в кремниевом асимметричном ступенчатом p-n переходе, если  $N_D = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $T = 300 \text{ К}$ .

$$N_D \gg N_A$$

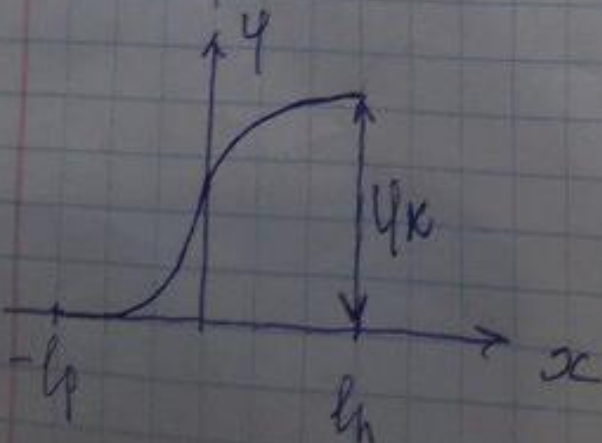
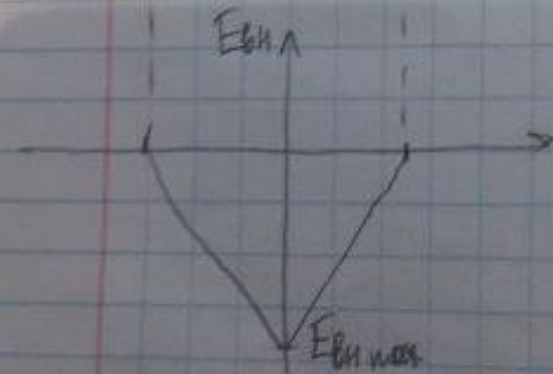
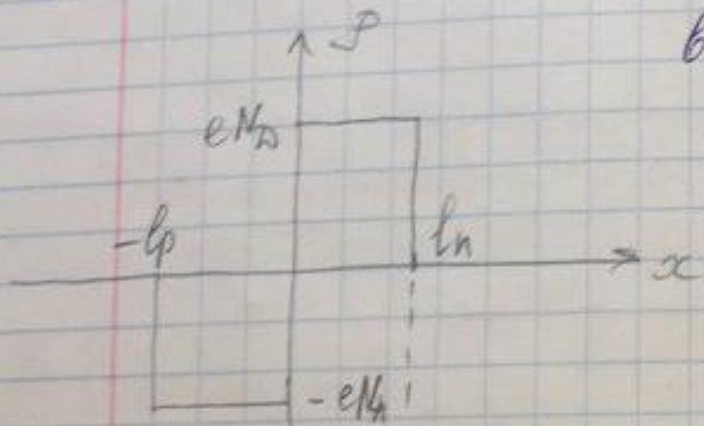
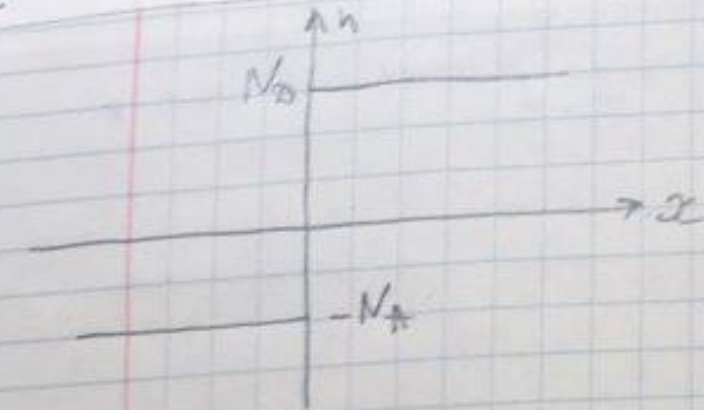
$$l_n \approx 0$$

$$L = l_p$$

$L$  - ширина обедненного слоя

В резких асимметричных p-n переходах весь обедненный слой находится в обл. с низкой легированной примесью

$$l_p = \frac{N_D}{N_A + N_D} \cdot L$$





13. В Si ступенчатом p-n-переходе при  $T=290$  К известно:  $N_D = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $T = 300$  К. Рассчитать: контактную разность потенциалов, ширину обедненного слоя, ширину обедненного слоя в n- и p- областях, максимальную напряженность электрического поля на металлургическом переходе, если концентрация собственных носителей заряда  $1.5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ,  $\epsilon = 12$ ,  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-14} \text{ Ф/см}$ .

- а) Как изменятся эти характеристики, если концентрацию донорной примеси не менять, а  $N_A = 10^{19} \text{ см}^{-3}$   
 б) Как изменится контактная разность потенциалов при замене материала Si на Ge?

$$\varphi_k = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_D \cdot N_A}{n_i^2} = 0,025 \ln \left( \frac{2 \cdot 10^{32}}{(1,5 \cdot 10^{10})^2} \right) = 0,6878$$

$$l = \sqrt{\frac{2 \epsilon \epsilon_0}{e} \varphi_k \frac{N_D + N_A}{N_D \cdot N_A}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{1} \cdot 0,6878 \cdot \frac{2 \cdot 10^{16} + 10^{16}}{2 \cdot 10^{32}}}$$

$$= 219 \cdot 10^{-15} \quad (853,8 \cdot 10^7)$$

$E_{\max} = \frac{d\varphi}{dx}$

$$l_p = \frac{N_D}{N_D + N_A} \cdot l \quad l_n = \frac{N_A}{N_A + N_D} \cdot l$$

если  $N_A = 10^{19}$ ,  $N_A \gg N_D$ ,  $l_p \approx 0$ ,  $l = l_n$

$$l = \sqrt{\frac{2 \epsilon_{\text{Ge}}}{e} \varphi_k \frac{1}{N_D}}$$

с ростом ширины запрещенной зоны  $\varphi_k$  увеличив.

а)  $\varphi_k(\text{Ge}) < \varphi_k(\text{Si})$ ;  $N_A = 10^{19}$ ,  $\varphi_k \uparrow$ ,  $l_p \downarrow$ ,  $E_{\max} \uparrow$   
 б)  $\text{Si} \rightarrow \text{Ge}$ ,  $\varphi_k \downarrow$

14. В Ge ступенчатом p-n переходе при  $T=290$  К удельное сопротивление p-области равно  $2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , а n-области  $1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Рассчитать контактную разность потенциалов при  $T=320$  К, если подвижность электронов равна  $3500 \text{ см}^2/\text{Вс}$ , подвижность дырок равна  $1900 \text{ см}^2/\text{Вс}$ .

$$N_D \Delta E_g = 0,67 \quad \varphi_k = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_D \cdot N_A}{n_i^2}$$

$$N_A \varphi_k = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_D \cdot N_A}{n_i^2}$$

$$\Delta E_g^{\text{Ge}} = 0,72$$

$$\rho_{\text{pp}} = \frac{1}{\sigma} = 2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$$

$$\rho^n = 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$$

$$\mu_n = 3500 \text{ см}^2/\text{Вс}$$

$$\mu_p = 1900 \text{ см}^2/\text{Вс}$$

$$\sigma_n = e N_D \mu_n$$

$$\frac{1}{\rho_n} = e N_D \mu_n$$

$$N_D = \frac{1}{\rho_n \cdot e \cdot \mu_n} = \frac{1}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3500} = 1,7857 \cdot 10^{15}$$

$$N_D = N_n$$

$$\sigma_p = e N_A \mu_p$$

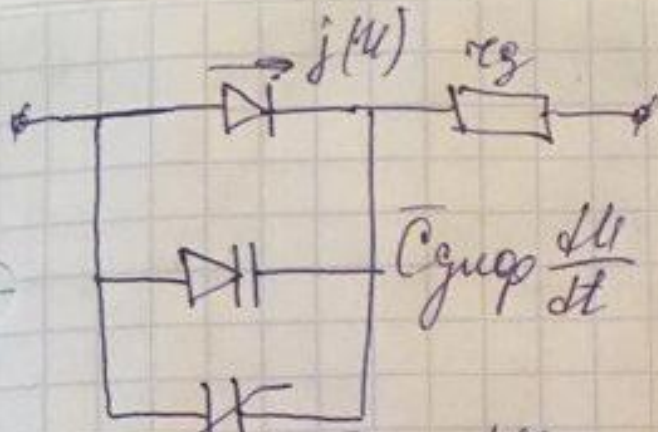
$$N_A = \frac{1}{\rho_p \cdot e \mu_p} = \frac{1}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1900} = 1,645 \cdot 10^{15}$$

$$N_A = p_p$$

$$n_i = \sqrt{N_c \cdot N_v} e^{-\frac{\Delta E_g}{2kT}}$$



15. Изобразите и сравните эквивалентные схемы полупроводниковых р - n диодов, используемые для расчетов статических режимов диодов и динамических процессов в них. Постройте статическую характеристику диода, имеющего при  $T = 300\text{ K}$  ток насыщения  $10^{-13}\text{ A}$  и сопротивление материала базы  $12\text{ Ом}$  при изменении прямого тока до  $30\text{ mA}$ .



Динамический режим

$C_{диф} \frac{dU}{dt}$  - заряд, накопленный в квазиэлектр. обл.

$C_{сар} \frac{dU}{dt}$  - заряд, накопленный в сверт. слое.

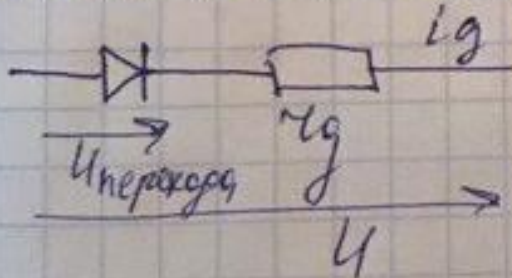
$r_g$  - сопротивление базы и электродов.

$C_{диф}(u) = \frac{q d_{диф}}{U}$  - существует, когда р-п переход открыт

Чем больше  $U_{откр}$ , тем  $\uparrow$  плотность тока и тем  $\uparrow C_{диф}$ .

Модель справедлива как для  $U > 0$ , так для  $U < 0$

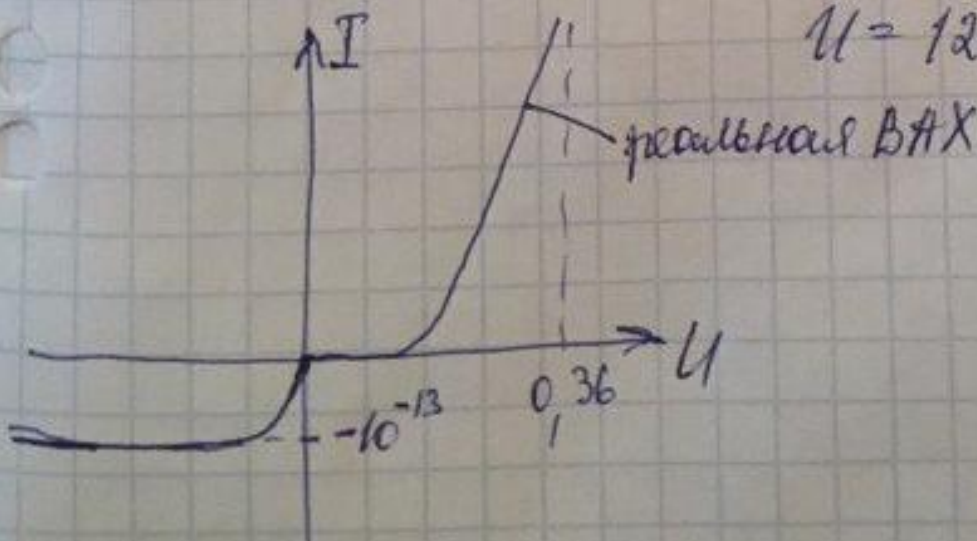
Статический режим:



$$i_g = I_s \left( e^{U_n / U_T} - 1 \right)$$

$$U_g = U_n + i_g \cdot r_g$$

$$U = 12 \cdot 0,03 = 0,36$$



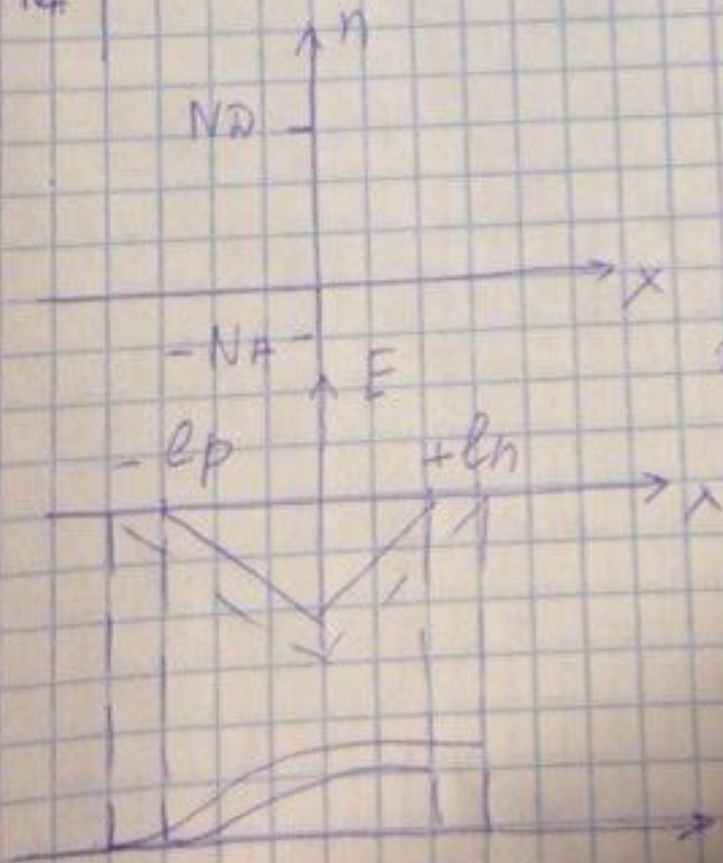
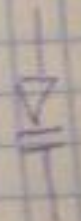
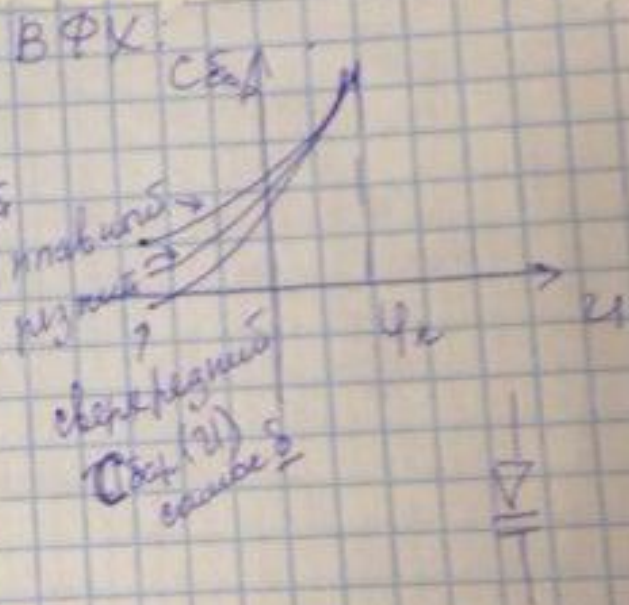
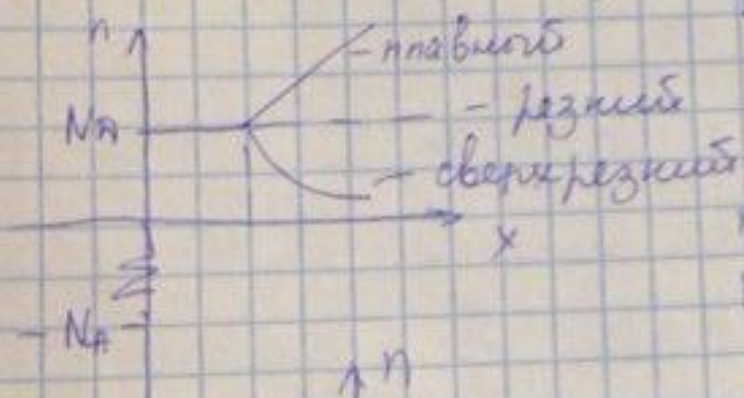


16. Изобразите и сравните между собой вольтфарадные характеристики варикапов с плавным, резким и сверхрезким  $p-n$  переходами. Для варикапа с резким ступенчатым переходом изобразите распределения плотности пространственного заряда, напряженности электрического поля и потенциала вдоль оси, перпендикулярной плоскости перехода, при двух значениях закрывающего напряжения.

16) ВФХ варикапов с плавным, резким, сверхрезким  $p-n$  переходами.

У резкого плотность от  $x$  построить,  $E(x)$ ,  $\psi(x)$ .

Варикап - диод, используемый как элемент СВЧ (УЗЧ) при изм. проформе и частоты.  $N_A(x)$



СВЧ. изм. от прямо-  
тленного напряжения  
- от этого изм. ин-  
тенсивности  
обедненного слоя  
 $u \Rightarrow$  расстояние  
между обводками

Варикап - диод, исп.  
как элемент

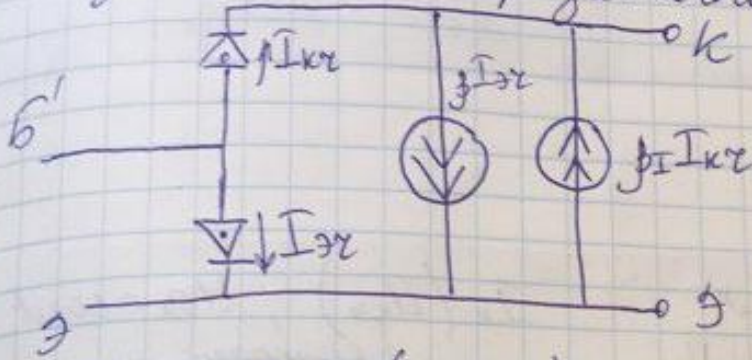
У. от низкочастотного

Част. Т. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100

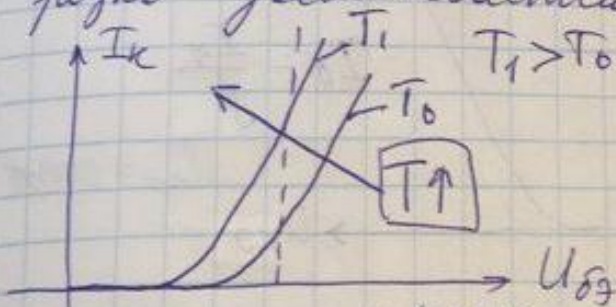


17. Пользуясь моделью Эберса-Молла, рассмотрите и сравните между собой зависимости тока коллектора биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, от температуры при фиксированном напряжении база-эмиттер и при фиксированном токе базы.

Модель Э-М - передаточная форма (г.к. 0Э)



①  $U_{бэ} = \text{const}$  (на входе)  
ток насыщения с ростом температуры резко увеличивается.



$$I_{\sigma} = I_{\sigma s} \left( e^{\frac{U_{бэ}}{U_T}} - 1 \right) + I_{krs} \left( e^{-\frac{U_{кэ} + U_{бэ}}{U_T}} - 1 \right)$$

$$I_k = \beta \cdot I_{\sigma s} \left( e^{\frac{U_{бэ}}{U_T}} - 1 \right) - (\beta + 1) I_{krs} \left( e^{-\frac{U_{кэ} + U_{бэ}}{U_T}} - 1 \right)$$

$$I_{\sigma s} = (1 - \alpha) I_{\sigma s}$$

$$I_{krs} = (1 - \alpha_I) I_{ks} \text{ - начальные токи фидеибинации}$$

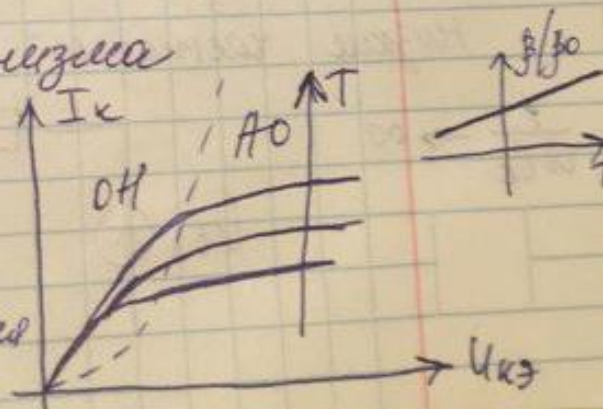
②  $I_{\sigma} = \text{const}$  БК - закрыт  
возникает 2 механизма

$$I_k = \beta I_{\sigma} + \frac{1}{1 - \alpha} I_{kbo}$$

$I_{kbo}(T)$  - по экспоненц. закону

$\beta(T)$  - по линейному

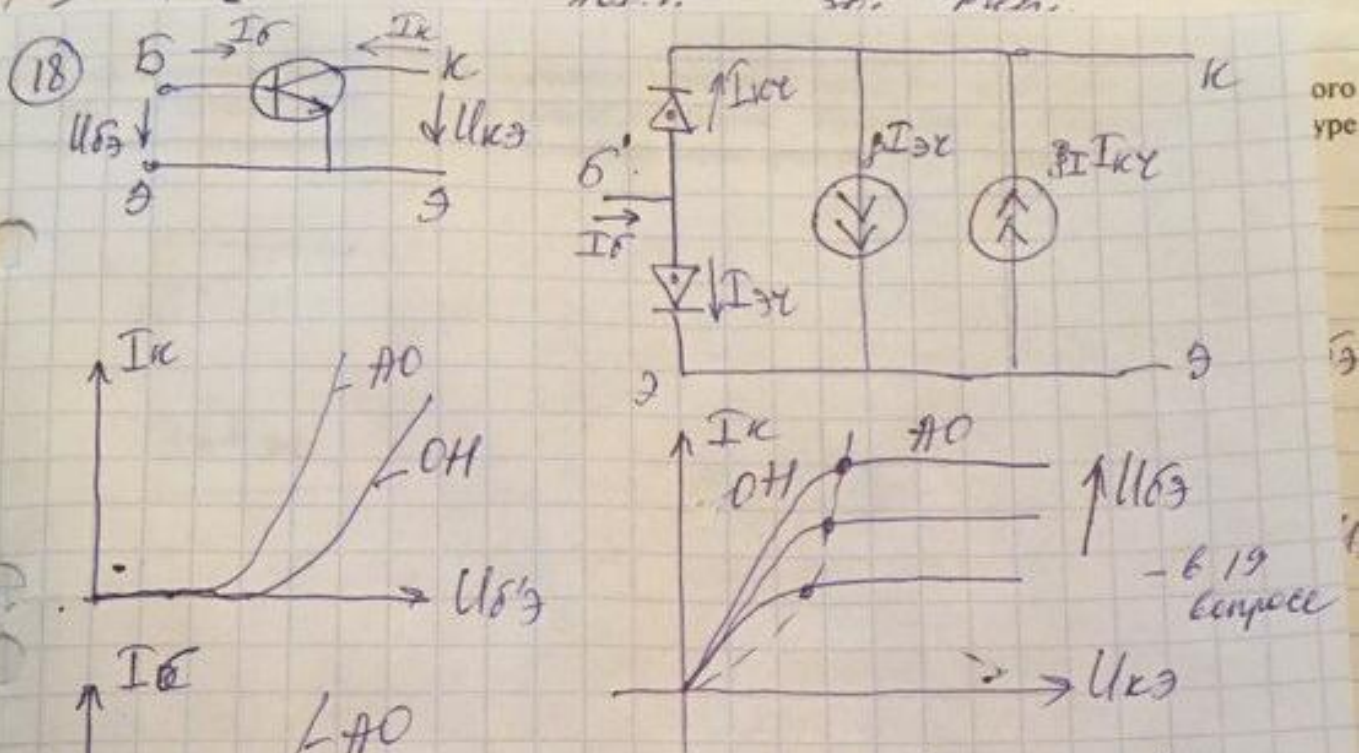
с ростом  $T$   $I_k$  резко увеличивается





18. Пользуясь моделью Эберса-Молла, постройте и поясните проходные характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, и его малосигнальную эквивалентную схему для низких частот. Какие явления в реальной структуре транзистора, заметно влияющие на вид этой эквивалентной схемы и форму проходных характеристик, не учитываются в этой модели?

19. Пользуясь моделью Эберса-Молла, постройте и поясните выходные характеристики биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером. Какие явления в реальной структуре транзистора, заметно влияющие на форму выходных характеристик, не учитываются в этой модели?

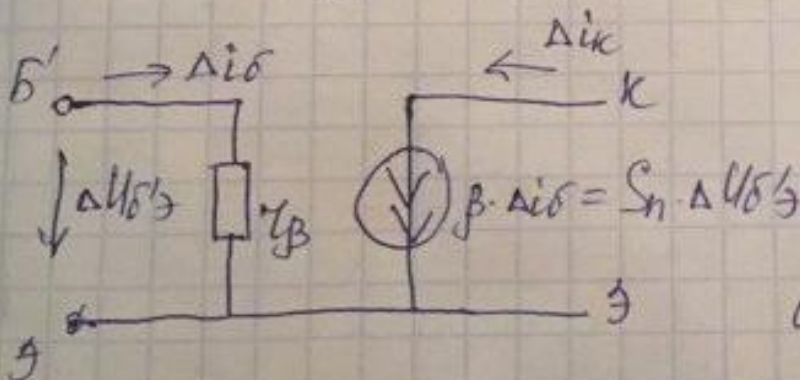


$$\tau_B = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta i_B / r_T} = \frac{\varphi_T}{I_{B0}}$$

$$S_n = \frac{\Delta i_C}{\Delta U_{BE}} \bigg|_{p.t.}$$

$$i_B = I_{B0} + \Delta i_B(t)$$

$$U_{BE} = U_{BE0} + \Delta U_{BE}(t)$$



в этой схеме не учитывается  $\tau_B$  внешнее диф. сопротивление,

не учитыв. сопротивление  $r_B$ , обратный ток закрытого БК перехода ( $I_{CBO}$ )  
Эта схема не может быть использована для описания БТ на высоких частотах.

$$\Delta i_C = \beta \Delta i_B = S_n \cdot \Delta U_{BE}$$

$\Delta i_B(t)$  - малое переменное напряжение



20. Граничные и предельные частоты биполярного транзистора. Соотношения между ними. Зависимости этих частот от параметров малосигнальной эквивалентной схемы транзистора и от рабочего тока.

рабочего тока.

$$\omega_{\beta} = \frac{1}{C_{\text{диф}} \cdot \tau_{\beta}}$$

$$S_n \cdot \tau_{\beta} = \frac{I_K^0}{\tau_T} \cdot \frac{\tau_T}{I_{\delta}^0} = \frac{I_K^0}{I_{\delta}^0} = \beta_0$$

$$\tau_{\beta} = \frac{\tau_T}{I_{\delta}^0}$$

$$S_n = \frac{I_K^0}{\tau_T}$$

$\omega_{\beta}$  - предельная частота коэф-та передачи  $\beta$  - частота, где  $\beta$  уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз.

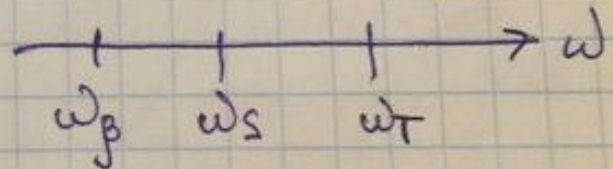
$\omega_T = \omega_{\beta}$  - граничная частота, на которой  $|\beta| = 1$   
 $|\beta(\omega_T)| = 1$

$$\omega_T = \beta_0 \cdot \omega_{\beta}$$

$$\omega_T = \frac{S_n}{C_{\text{диф}}}$$

$$f_{\beta} = \frac{f_T}{\beta}$$

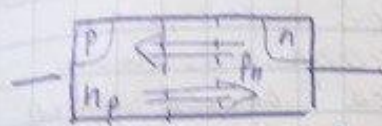
$$\omega_s = \frac{1}{C_{\text{диф}} \cdot \frac{\tau_{\delta} \tau_{\beta}}{\tau_{\delta} + \tau_{\beta}}}$$



$\omega_s$  - частота, на которой крутизна по входу уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз.



21. Лавинный и зенеровский пробой в диодах с р - n переходом. Условия возникновения, особенности, температурный коэффициент по напряжению.



$n_h$  - основное -  $M_p$   
 $p_n$  - неосновн. - дырки

$p_p$  -  $M_n$  (основн.)

$n_p$  - неосновн.

Если  $|E_{max}| \geq 10^5$  В/см, неосновные носители приобретают энергию, достаточную для ионизации атомов, находящихся в системе валентной связи и образуется новая пара носителей. возникает лавинный пробой.  
 $\psi$  - среднее число ионизировавшихся стоек при проходе неосновными носителями обедненного слоя.

$$\psi = \left( \frac{E_{max}}{E_{max \text{ пробоя}}} \right)^m \quad m = (4 \div 7) \text{ зависит от концентр. примесей, } \pm$$

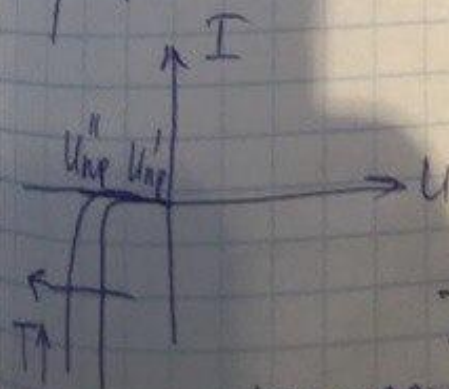
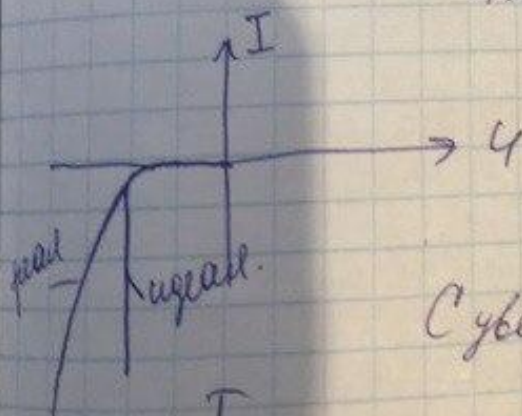
$\psi(E_{max})$  - ф-ция удлинения

$$I = I \cdot \psi + I_s$$

1 ток носителей за счет экстракции

$$TKU = \frac{\Delta U_{пр}}{U_{пр} \cdot \Delta T} \approx 0,07 \% / K$$

темпер. коэф. напряж. пробоя.



С увеличением  $T$ , уменьшается длина свободного пробега,  $\uparrow$  кол-во столкновений и меньше энергии накапливается за счет поля.

Поэтому для создания пробоя необходимо увеличивать приложенное напряжение

$T \uparrow \rightarrow I_s \uparrow \rightarrow I_{обр. течения} \uparrow \Rightarrow$  рабочий пробой переходит в тепловой необратимый и р - n переход разрушается.



22. Влияние омического сопротивления базовой области на работу биполярного транзистора на низких и высоких для него частотах. Как влияет это сопротивление на вид проходной характеристики в активной области? Какие элементы высокочастотной эквивалентной схемы биполярного транзистора отражают это влияние?

22) Вл 7844 на прох и вх хар БТ

переход. формула модели

$I_B(U_{BE})$

$I_{BE} = I_S + U_{BE}' + I_{BE} \rightarrow K$

$I_E = I_B + I_C = I_B(1+\beta)$

$I_{BE} = U_{BE}' + (r_B + r_e(1+\beta))I_B$

крут вх хар  $S_B = \frac{\Delta I_B}{\Delta U_{BE}} \Big|_{PT}$

$S_{B \text{ реал}} < S_{B \text{ идеал}}$  в  $\beta$  раз?

$S_B(\text{но перех}) = \frac{\Delta I_B}{\Delta U_{BE}'} \Big|_{PT}$

$S(\text{но вх}) = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{BE}} \Big|_{PT}$   $S_n > S$

чтобы учесть вх сопр гбн Гэ на рисунке прох хар БТ, надо в АО, зап. формулу  $U$  между реальными базами б4э:

$U_{BE} = U_{BE}' + r_B I_B(U_{BE}') + r_e(I_C(U_{BE}') + I_B(U_{BE}'))$

$I_C = \beta \cdot I_B \Rightarrow U_{BE} = U_{BE}' + (\beta^{-1} r_B + (1+\beta^{-1}) r_e) I_C(U_{BE}') \Rightarrow$  прох хар реал тр  $I_C(U_{BE})$  при

$U_{BE} = \text{const}$  мб. полуз. су. прох хар. модели эб-м, величина  $I_C$  увел  $U_{BE}'$  на вел, соотв II слаг.: видно, что учет вл 7844 прив к  $\downarrow I_C$  при зад.  $U_{BE}$  и  $\downarrow$  крут. прох хар

с учетом

эб-м

АО

$I_C, AO$

$I_B$

$U_{BE}$

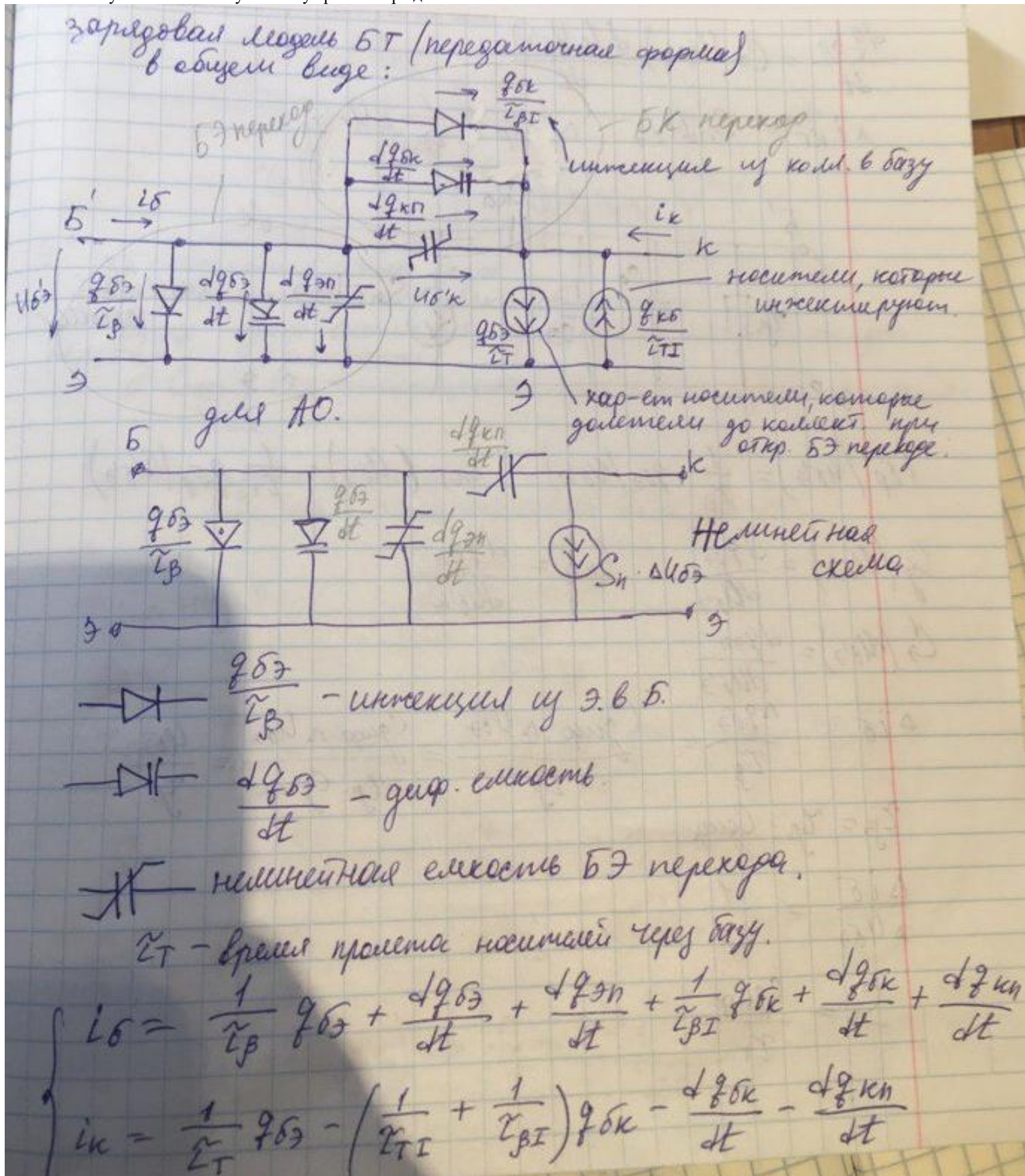
40)  $U_{BE} > U_{onnp} \quad I_{K'} = -I_{KS}$

$U_{BE} < U_{onnp} \quad I_{KS} < \alpha \cdot I_E'; \alpha I_{KS} < I_E'; I_C = \alpha I_E'; I_B = (1-\alpha) I_E'$

эб сх в АО:



23. Запишите и поясните уравнения зарядовой модели биполярного транзистора. Изобразите схему передаточной зарядовой модели в общем случае и для активной области. Покажите, как из зарядовой модели можно получить высокочастотную малосигнальную эквивалентную схему транзистора для активной области.



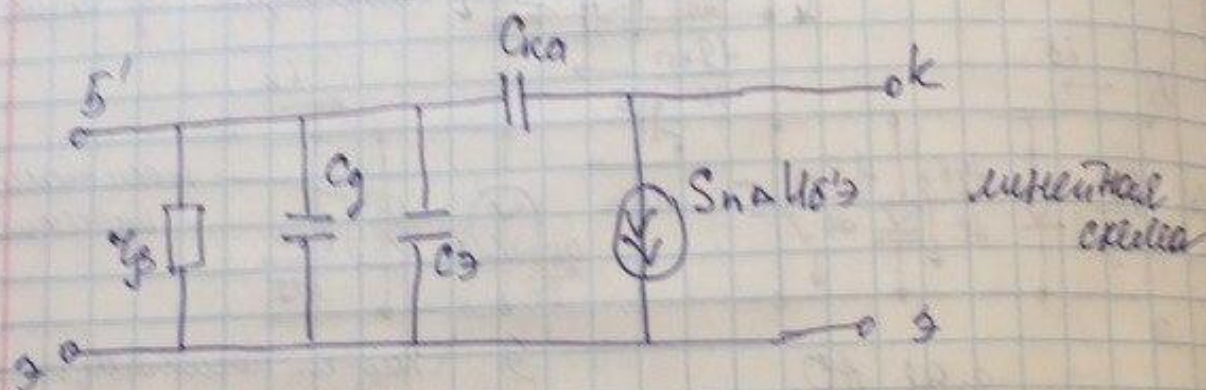


$$\frac{d i_{D1}}{dt} = g_1(u_{D1}) \frac{d(\Delta u_{D1})}{dt}$$

$$\frac{d i_{Kn}}{dt} = C_{Kn}(u_{D1} - u_{Kn}) \frac{d(u_{Kn})}{dt}$$

$$\frac{d i_{Kn}}{dt} = C_2(u_{D1}) \frac{d(\Delta u_{D1})}{dt}$$

$$\Delta i_{Kn} = S_{n \Delta u_{D1}} \quad \Delta i_{D1} = \frac{1}{r_p} \Delta u_{D1}$$



$$i_{D1}(u_{D1}) = \frac{1}{r_p} g_{D1}(u_{D1}) \quad i_{Kn}(u_{D1}) = \frac{1}{r_k} g_{Kn}(u_{D1})$$

$$C_g(u_{D1}) = \frac{d i_{D1}}{d u_{D1}} \quad C_{Kn} = \frac{d i_{Kn}}{d u_{D1}}$$

$$C_2(u_{D1}) = \frac{d i_{Kn}}{d u_{D1}}$$

$$\Delta i_{D1} = \frac{\Delta g_{D1}}{r_p} = \frac{C_{g_{D1}} \cdot \Delta u_{D1}}{r_p} = \frac{C_{g_{D1}} \cdot \Delta u_{D1}}{r_p \cdot C_{g_{D1}}} = \frac{u_{D1}}{r_p}$$

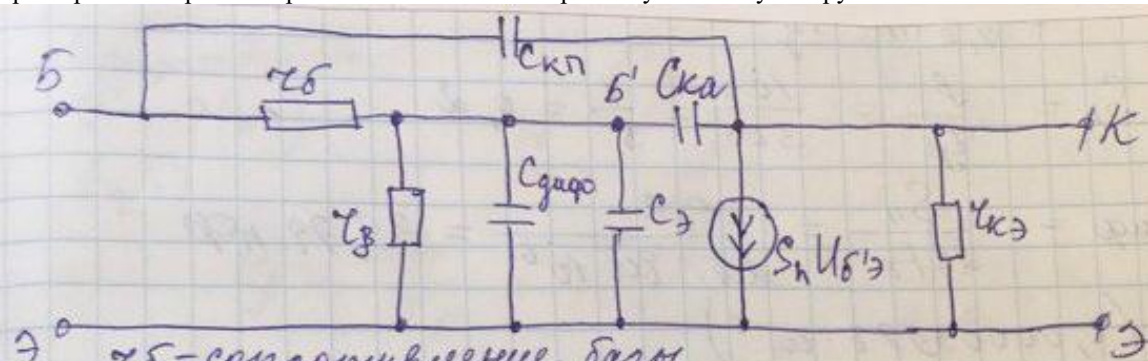
$$r_p = r_p \cdot C_{g_{D1}}$$

$$\frac{\Delta i_{D1}}{\Delta u_{D1}} = \frac{1}{r_p}$$

$$S_n = \frac{C_{g_{D1}}}{r_p}$$



24. Изобразите малосигнальную высокочастотную эквивалентную схему биполярного транзистора для активной области (схему Джиаколетто). Поясните физический смысл ее элементов. Для режима, в котором постоянный ток коллектора  $I_{K0} = 5 \text{ мА}$ ,  $C_{\varepsilon} = 8 \text{ пФ}$ ,  $C_{\text{скп}} = C_{\text{ска}} = 1 \text{ пФ}$ ,  $r_{\text{б}} = 100 \text{ Ом}$ ,  $\beta = 100$ ,  $f_T = 800 \text{ МГц}$  найдите диффузионную емкость СД, крутизну проходной характеристики транзистора на низкой частоте и граничную частоту по крутизне.



$r_{\text{б}}$  - сопротивление базы  
 $r_{\text{э}}$  - сопротивление эмиттера  
 $C_{\text{дифф}}$  - диф. емкость, существует только, когда переход открыт  
 $C_{\text{скп}}, C_{\text{ска}}$  - барьерные емкости закрытого перехода  
 $I_{\text{кол}}$  - ток

$C_{\varepsilon}$  - барьерная емкость  
 $r_{\text{кэ}}$  - сопротивление кол. эмит.

$$C_{\text{дифф}} = \frac{S_h}{2\pi f_T}$$

$S_{\text{н}} (\text{на НЧ})$  - ?

$$S = \frac{\beta}{r_{\text{б}} + r_{\text{э}}}$$

$$r_{\text{б}} = \frac{U_T}{I_{\text{б}}} = \frac{U_T \cdot \beta}{I_{\text{к0}}} = \frac{25 \cdot 10^{-3} \cdot 100}{5 \cdot 10^{-3}} = 500 \text{ (Ом)}$$

$$S = \frac{100}{100 + 500} = \frac{100}{600} = 0,1666$$

$$2\pi f_s = \omega_{\beta} \left(1 + \frac{r_{\text{э}}}{r_{\text{б}}}\right)$$

$$\frac{\omega_s}{\omega_{\beta}} = 1 + \frac{r_{\text{э}}}{r_{\text{б}}}$$

$$\omega_s = \omega_{\beta} \left(1 + \frac{r_{\text{э}}}{r_{\text{б}}}\right) \Rightarrow f_s = \frac{\omega_{\beta} \left(1 + \frac{r_{\text{э}}}{r_{\text{б}}}\right)}{2\pi} = \frac{2\pi f_T \left(1 + \frac{r_{\text{э}}}{r_{\text{б}}}\right)}{2\pi \beta}$$

$$f_s = \frac{f_T \left(1 + \frac{r_{\text{э}}}{r_{\text{б}}}\right)}{\beta} = \frac{800 \cdot 10^6 \left(1 + \frac{500}{100}\right)}{100} = 48 \cdot 10^6 = 4,8 \cdot 10^7 \text{ Гц}$$

$$S_h = \frac{\beta}{r_{\text{б}}} = \frac{100}{500} = \frac{1}{5} = 0,2$$

$$C_{\text{дифф}} = \frac{S_h}{2\pi f_T} = \frac{0,2}{2\pi \cdot 800 \cdot 10^6} = 39,78 \text{ пФ}$$



25. Изобразите малосигнальную высокочастотную эквивалентную схему биполярного транзистора для активной области (схему Джиаклетто). Поясните физический смысл ее элементов. Для режима, в котором постоянный ток коллектора  $I_{K0} = 5 \text{ мА}$ ,  $S_{\beta} = 8 \text{ пФ}$ ,  $S_{\alpha} = S_{\kappa\pi} = 1 \text{ пФ}$ ,  $r_{\beta} = 50 \text{ Ом}$ ,  $\beta = 100$ ,  $f_T = 1000 \text{ МГц}$  найдите диффузионную емкость  $C_D$ , крутизну проходной характеристики транзистора на низкой частоте и граничную частоту по крутизне

$$C_{\text{диф}} - ?$$

$$S - ? (\text{мА/В})$$

$$f_s - ?$$

$$C_{\text{диф}} = \frac{S_n}{2\pi f_T}$$

$$S_n = \frac{\beta}{r_{\beta}}$$

$$r_{\beta} = \frac{r_T}{I_{\beta}} = \frac{r_T \beta}{I_{K0}} = \frac{25 \cdot 10^{-3} \cdot 100}{5 \cdot 10^{-3}} = 500 (\text{Ом})$$

$$S_n = \frac{100}{500} = 0,2 \quad C_{\text{диф}} = \frac{0,2}{2\pi \cdot 1000 \cdot 10^6} = 31,8 \text{ пФ}$$

$$S = \frac{\beta}{r_{\beta} + r_{\alpha}} = \frac{100}{50 + 500} = \frac{100}{550} = 0,182$$

$$\frac{\omega_s}{\omega_{\beta}} = 1 + \frac{r_{\beta}}{r_{\alpha}} \quad \omega_{\beta} = \frac{\omega_T}{\beta} = \frac{2\pi f_T}{\beta}$$

$$\omega_s = \left(1 + \frac{r_{\beta}}{r_{\alpha}}\right) \cdot \frac{2\pi f_T}{\beta}$$

$$\omega_s = 2\pi f_s \Rightarrow f_s = \frac{\omega_s}{2\pi}$$

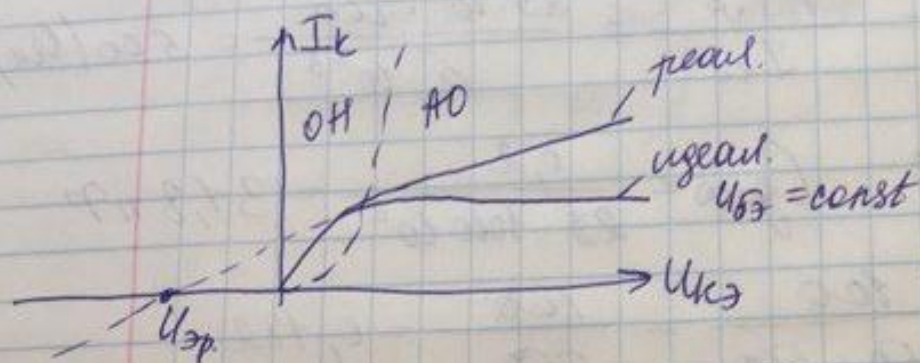
$$\omega_s = \frac{f_T}{\beta} \left(1 + \frac{r_{\beta}}{r_{\alpha}}\right) = \frac{1000 \cdot 10^6}{100} \left(1 + \frac{500}{50}\right) = 110 \cdot 10^6$$



26. Поясните физический механизм влияния коллекторного напряжения в биполярном транзисторе на ток коллектора. Сравните по степени этого влияния схемы с заданным напряжением база-эмиттер и с заданным током базы. Какие элементы в малосигнальной низкочастотной эквивалентной схеме транзистора отражают это влияние?

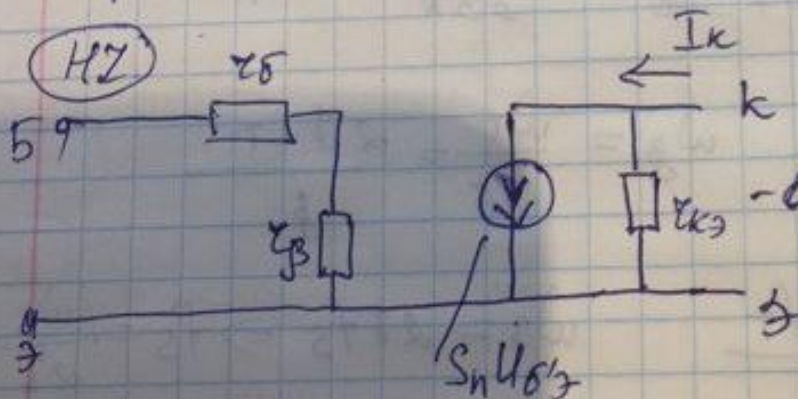
Если  $I_B = \text{const}$ , то уменьшается выходное диод-ное сопротивление БТ.

$$r_{kэ} = \left. \frac{\Delta U_{кэ}}{\Delta I_k} \right|_{p.t.}$$



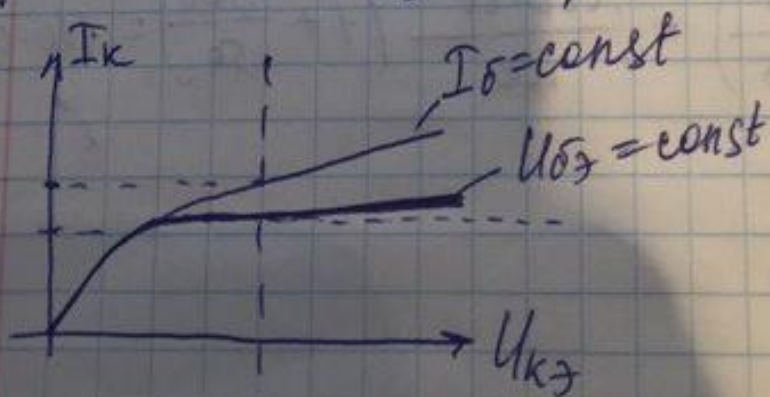
$$\text{идеал. БТ: } r_{kэ} = \left. \frac{\Delta U_{кэ}}{\Delta I_k} \right|_{U_{бэ} = \text{const}}$$

$$\text{факт БТ: } r_{kэ} = \text{const}$$



- выходное диод. сопротивление

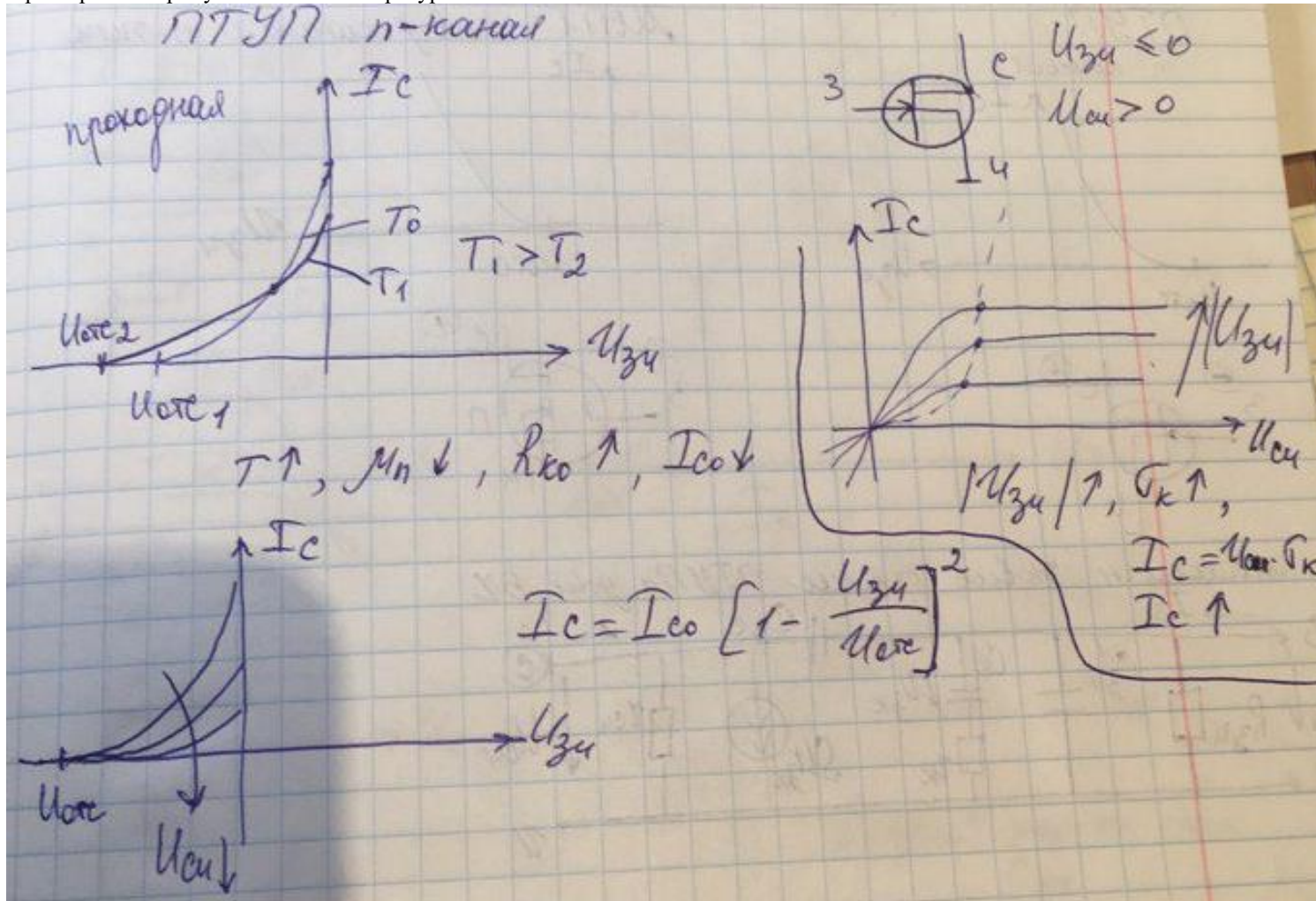
сопротивление  $r_{кэ}$  отражает это влияние.



$$r_{kэ} \big|_{I_B = \text{const}} < r_{kэ} \big|_{U_{бэ} = \text{const}}$$



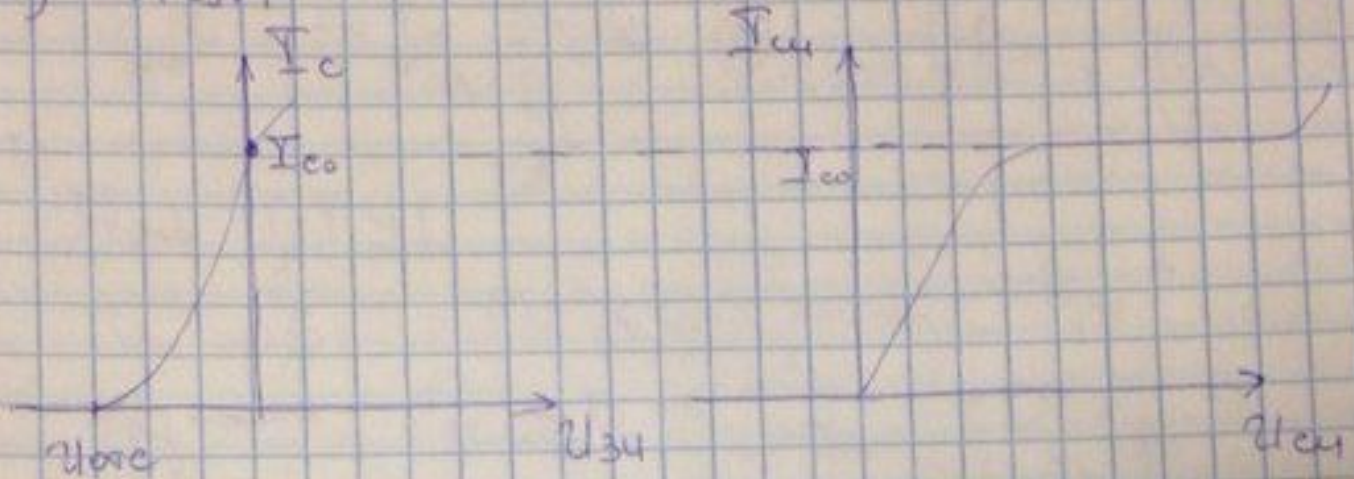
27. Изобразите и поясните проходные и выходные статические характеристики полевого транзистора с управляющим р - n переходом и n каналом, соответствующие нескольким значениям напряжения затвор-исток. Как изменится положение этих характеристик при увеличении температуры.



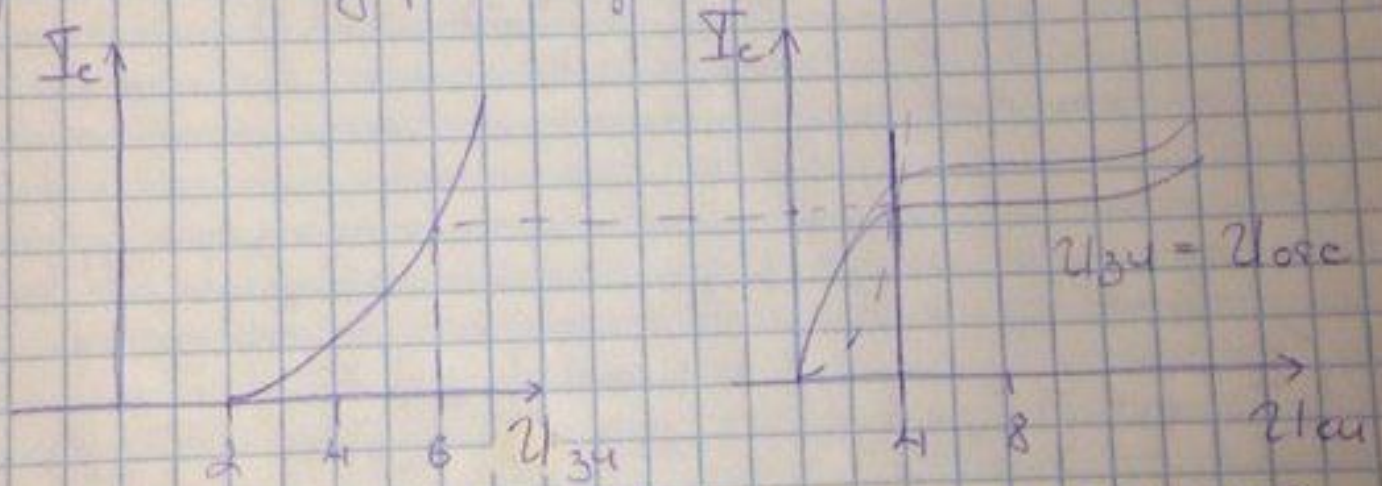


28. Изобразите и сравните между собой проходные и выходные характеристики полевых транзисторов с управляющим переходом и p каналом и с наведенным p каналом. Сравните также малосигнальные высокочастотные эквивалентные схемы этих транзисторов.

1) ПТЧП



2) МОПТ с упр. наведенным p каналом



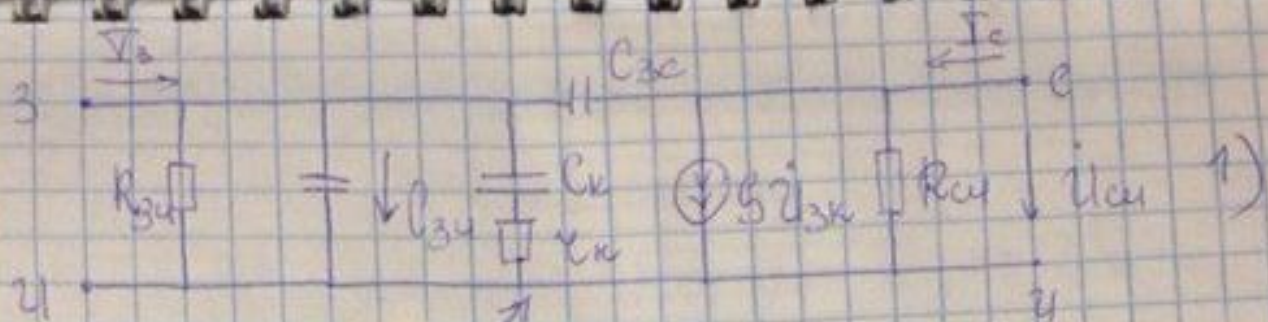
У ПТЧП проходная характ. отрицательная

=> рабочая область отрицательная. У МОПТ

все наоборот.

Схемы //



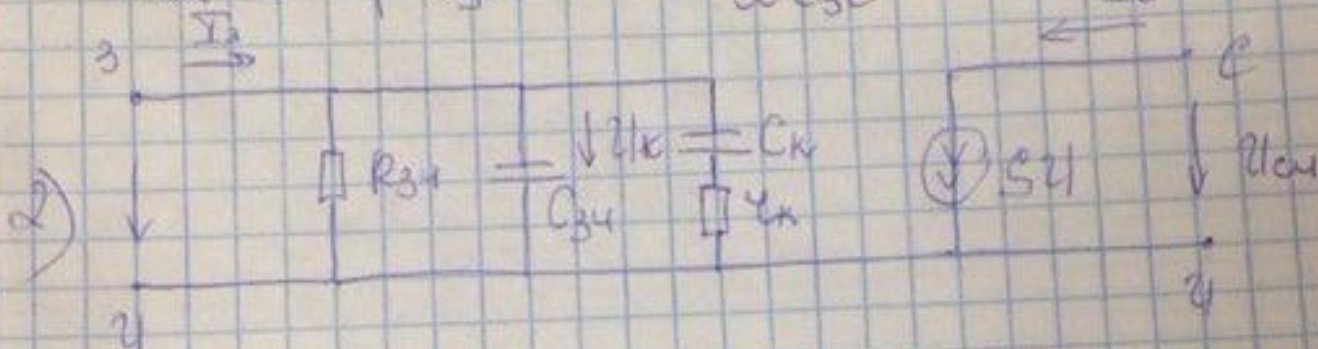


Для ПТЧП

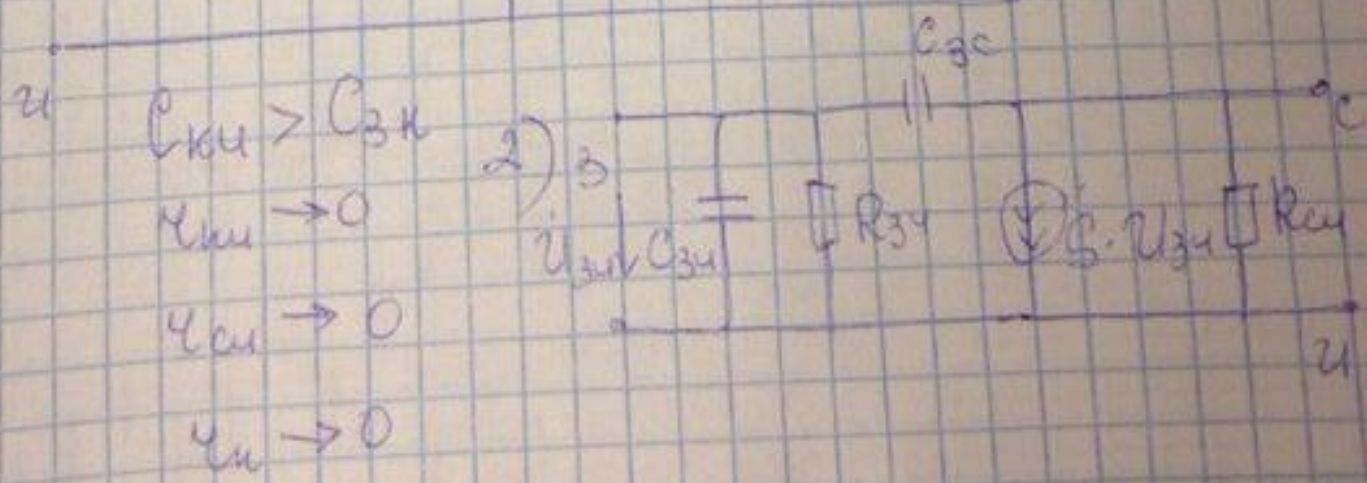
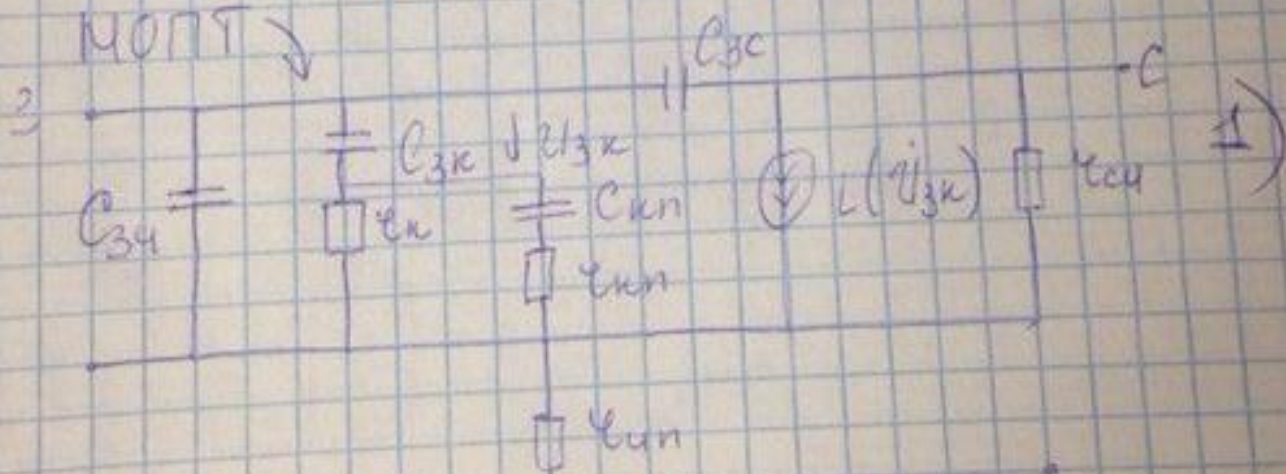
$$C_{3c} = 35$$

$C_{3c}$  - очень мало  $\rightarrow R_{3c} \uparrow$

$$R_{3c} \rightarrow \infty, C_{3c} \rightarrow 0 \rightarrow \frac{1}{\omega C_{3c}} \rightarrow \infty$$



МОПТ



$$C_{3c} > C_{3k}$$

$$C_{3k} \rightarrow 0$$

$$C_{3c} \rightarrow 0$$

$$C_{3k} \rightarrow 0$$



29. Изобразите и сравните между собой проходные статические характеристики и малосигнальные высокочастотные эквивалентные схемы биполярного п-р-п транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, и полевого транзистора с управляющим переходом и п каналом, включенного по схеме с общим истоком.

п-р-п БТ, ОЭ

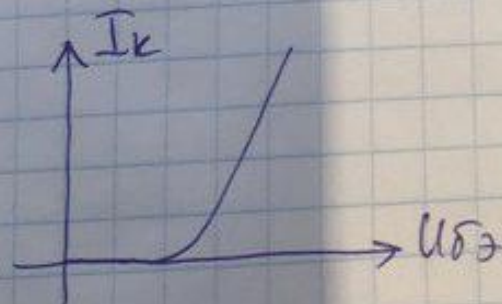
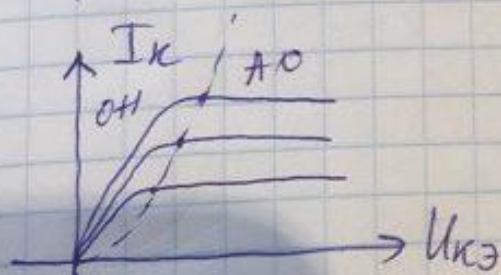
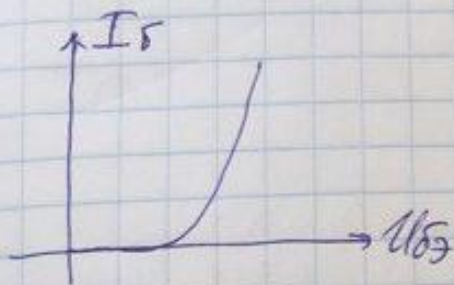
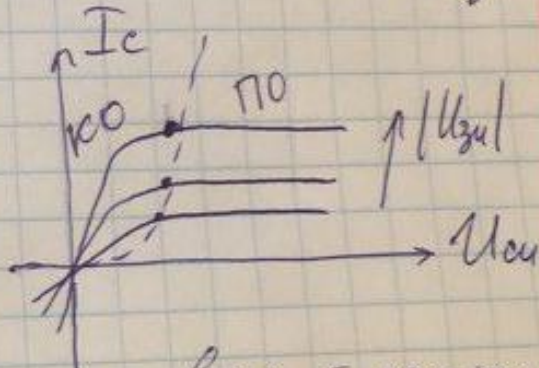
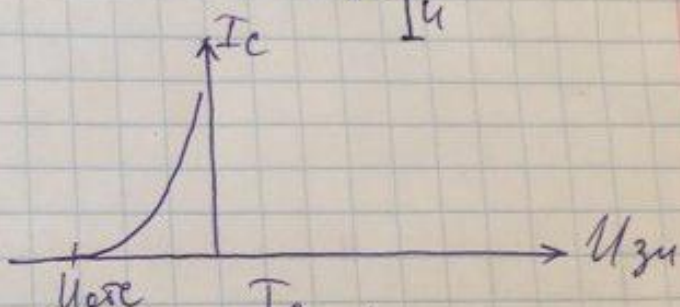
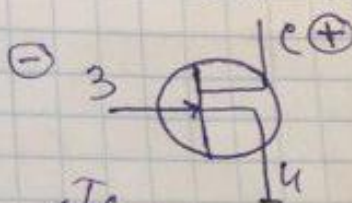
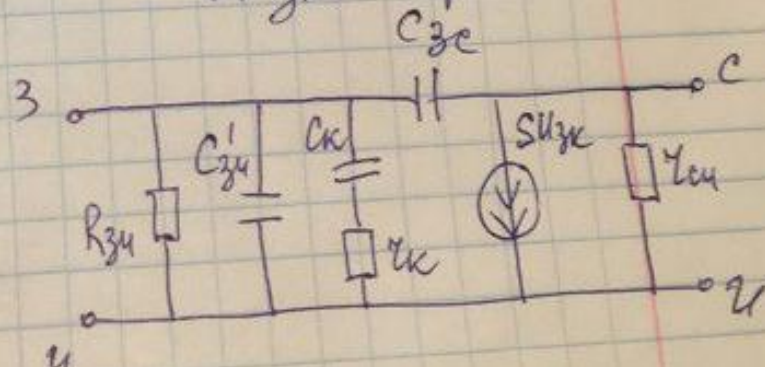


схема для измерения

ПТЧП п-канал О.И.

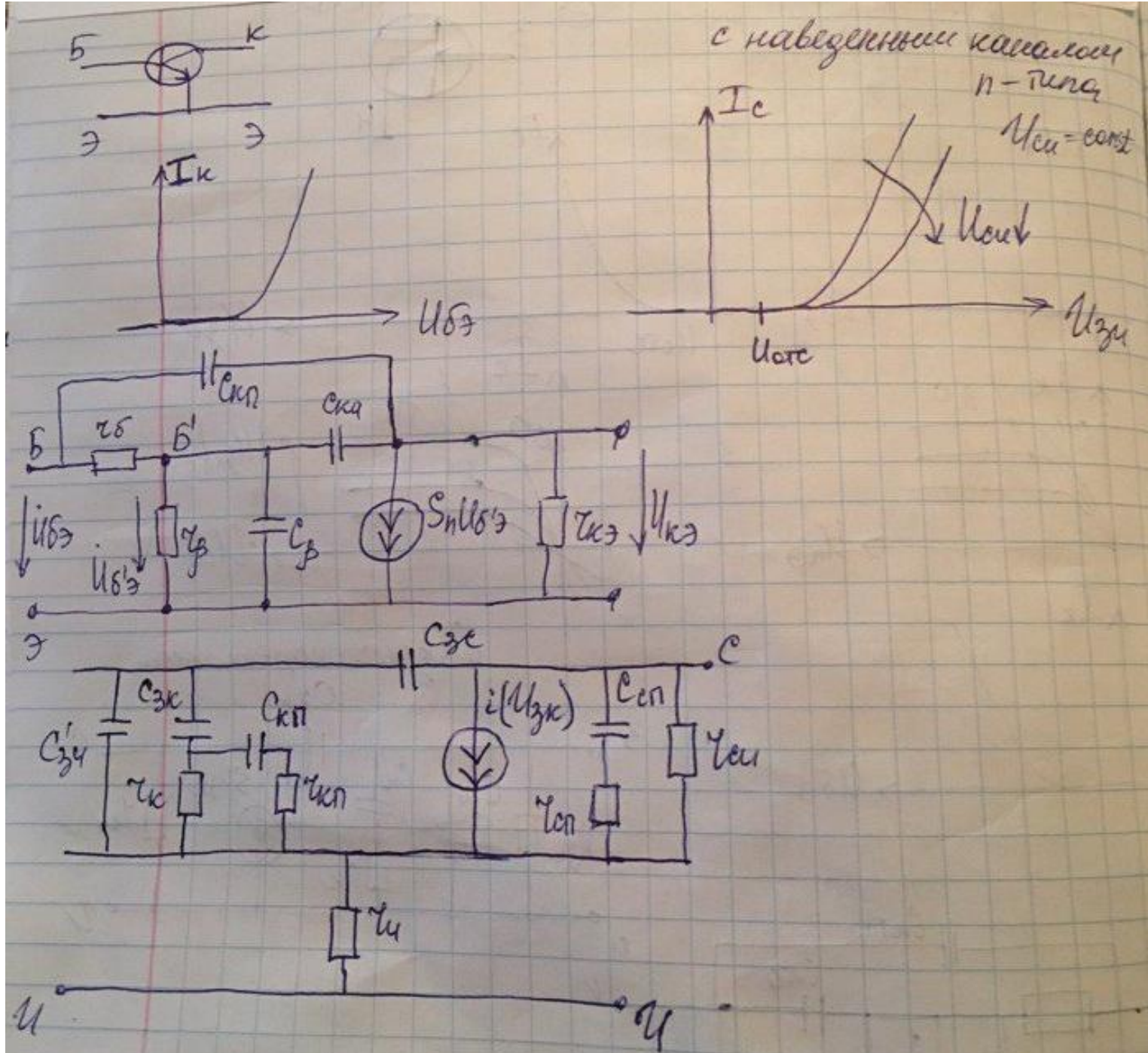


Входная хар-ка или

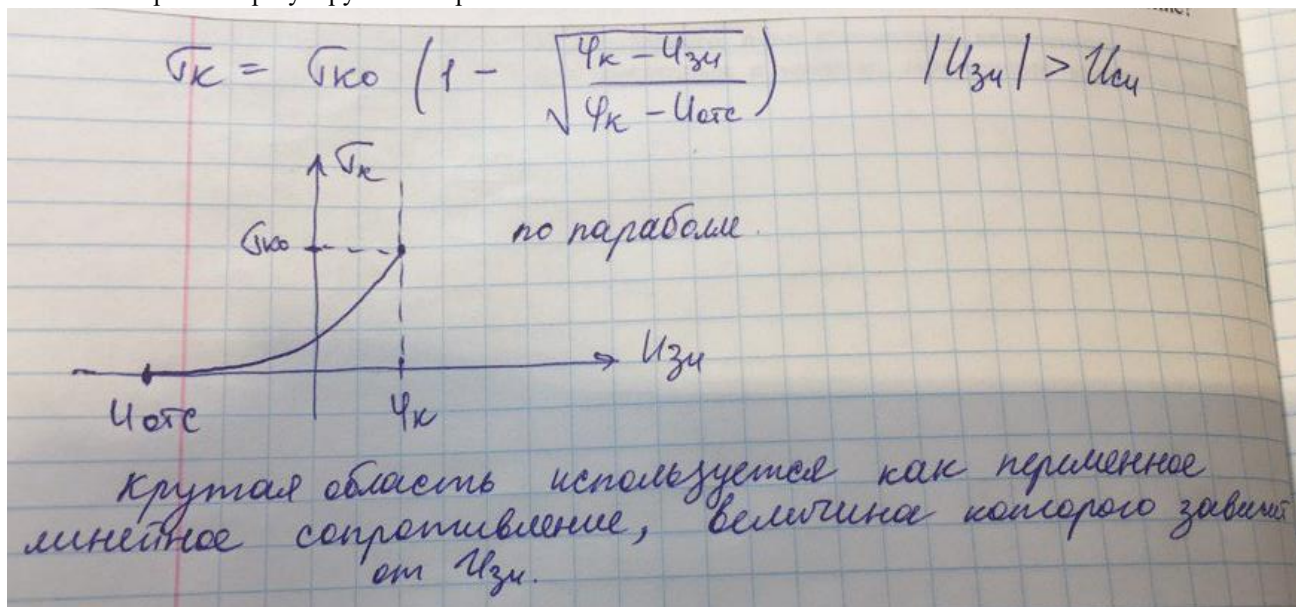




30. Изобразите и сравните между собой проходные статические характеристики и малосигнальные высокочастотные эквивалентные схемы биполярного п-р-п транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, и полевого транзистора с наведенным п каналом, включенного по схеме с общим истоком.



31. Как зависит от напряжения между затвором и истоком полевого транзистора с управляющим р-п переходом проводимость канала при малых напряжениях между стоком и истоком. При каких условиях полевой транзистор можно использовать как линейное электрически регулируемое сопротивление?





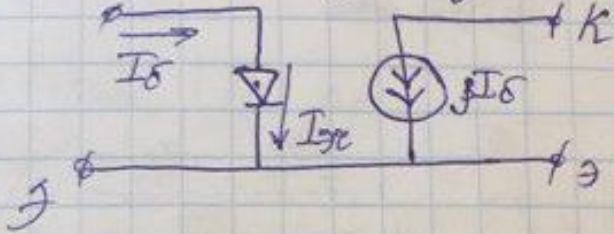
32. Определите в какой области работает Si p-n БТ, если  $U_{БЭ} = 0,65 \text{ В}$ ,  $U_{БК} = -10 \text{ В}$ . Нарисуйте передаточную модель БТ, описывающую работу БТ по постоянному току в этой области. Напишите уравнения для расчета входных, проходных и выходных характеристик БТ, включенного по схеме ОЭ. Изобразите входные и проходные характеристики для активной области и области насыщения характеристики.

$$U_{БЭ стк} = 0,6 \text{ В}$$

$$U_{БК стк} = 0,6 \text{ В}$$

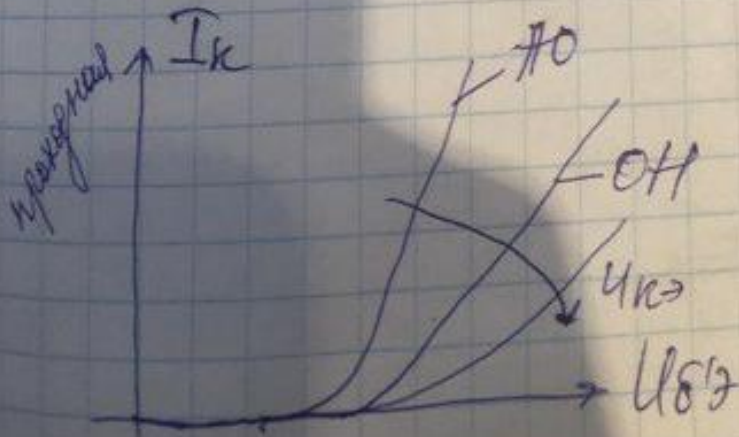
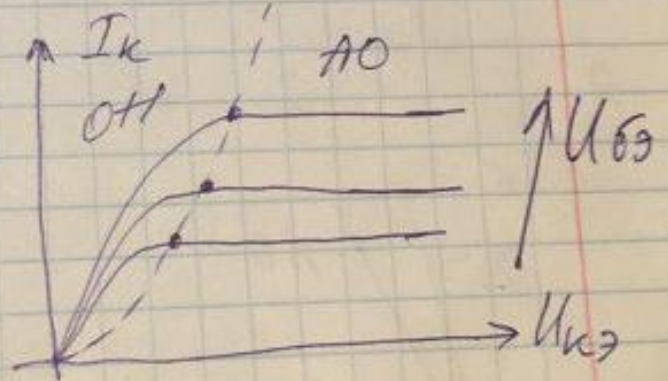
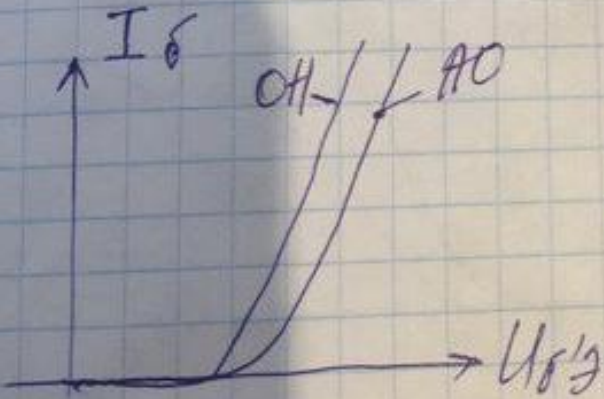
$$\left. \begin{aligned} U_{БЭ} = 0,65 > U_{стк} \\ U_{БК} = -10 < U_{стк} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} &\text{БЭ открыт} \\ &\text{БК переключен} \\ &\text{закрывается} \end{aligned}$$

БТ работает в А.О.  
передаточная модель для А.О.



проходная хар-ка  
 $I_{К}(U_{БЭ})$   
входная  $I_{Б}(U_{БЭ})$   
выходная  $I_{К}(U_{КЭ})$

$$\begin{cases} I_{Б} = I_{Эс} \left( e^{\frac{U_{БЭ}}{U_T}} - 1 \right) + I_{Кс} \left( e^{\frac{-U_{КЭ} + U_{БЭ}}{U_T}} - 1 \right) \\ I_{К} = \beta I_{Эс} \left( e^{\frac{U_{БЭ}}{U_T}} - 1 \right) - (\beta + 1) I_{Кс} \left( e^{\frac{-U_{КЭ} + U_{БЭ}}{U_T}} - 1 \right) \end{cases}$$





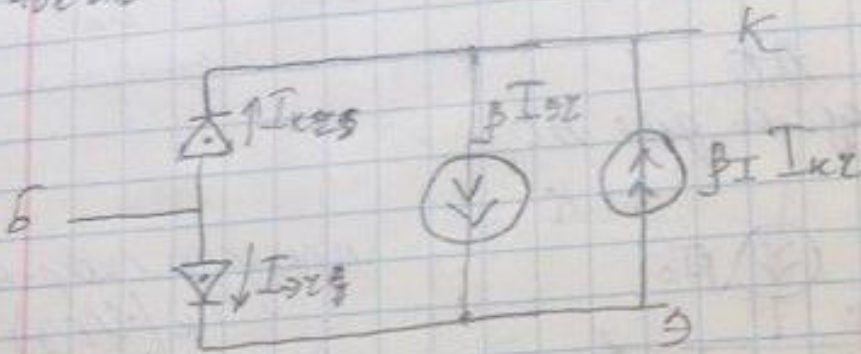
33. Определите в какой области работает Si n-p-n БТ, если  $U_{БЭ} = 0,7 \text{ В}$ ,  $U_{БК} = 1 \text{ В}$ . Нарисуйте передаточную модель БТ, описывающую работу БТ по постоянному току в этой области. Напишите уравнения для расчета входных, проходных и выходных характеристик БТ в области насыщения, включенного по схеме ОЭ. Изобразите входные и выходные характеристики для активной области и области насыщения характеристики.

включенного по схеме  
области насыщения характеристики.

$$U_{БЭ\text{ак}} = 0,6 \text{ В}$$

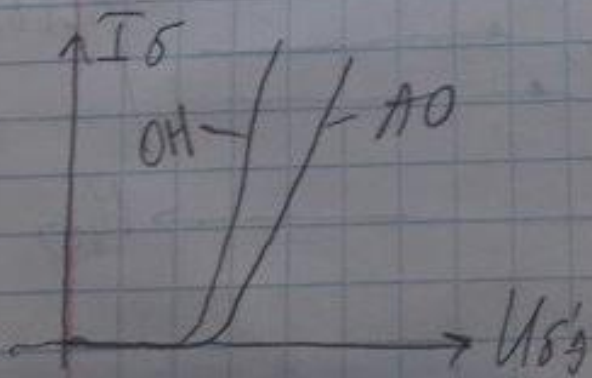
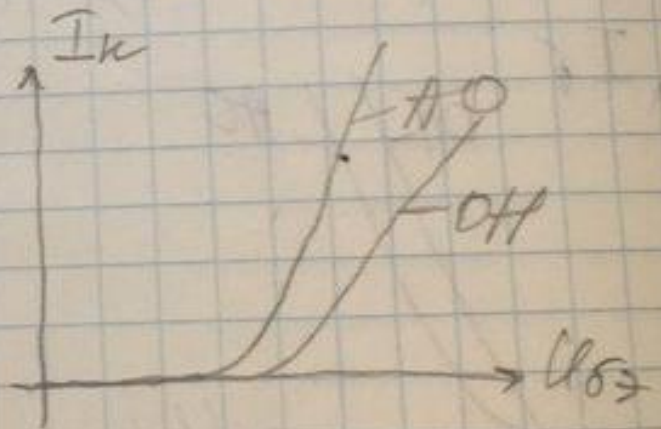
$$U_{БК\text{ак}} = 0,6 \text{ В}$$

$$\begin{matrix} U_{БЭ} > U_{БК} \\ U_{БК} > U_{ЭК} \end{matrix} \Rightarrow \text{БТ работает в ОН}$$

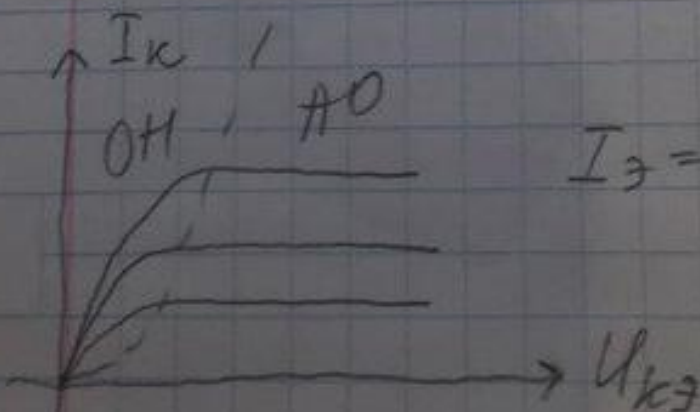


$$I_{\delta} = I_{\text{БЭс}} \left( e^{\frac{U_{БЭ}/U_T}{1}} - 1 \right) + I_{\text{Кс}} \left( e^{\frac{-U_{БК} + U_{БЭ}}{U_T}} - 1 \right)$$

$$I_{\kappa} = \beta I_{\text{БЭс}} \left( e^{\frac{U_{БЭ}/U_T}{1}} - 1 \right) - (\beta + 1) I_{\text{Кс}} \left( e^{\frac{-U_{БК} + U_{БЭ}}{U_T}} - 1 \right)$$



$$I_{\text{Э}} = I_{\delta} + I_{\kappa}$$

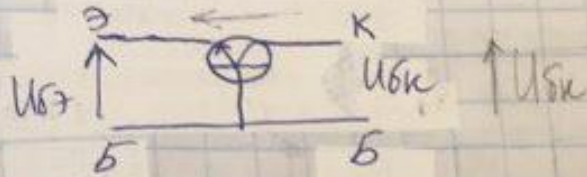




34. Определите в какой области работает Si n-p-n БТ, если  $U_{БЭ} = 0,65 \text{ В}$ ,  $U_{КЭ} = 10 \text{ В}$ . Нарисуйте инжекционную модель БТ, описывающую работу БТ по постоянному току в этой области. Напишите уравнения для расчета входных, проходных и выходных характеристик БТ, включенного по схеме ОЭ. Изобразите выходные и проходные характеристики для активной области и области насыщения характеристики.

$$U_{БЭ} > U_{КЭ}$$

$$U_{КЭ} = 10 \text{ В}$$



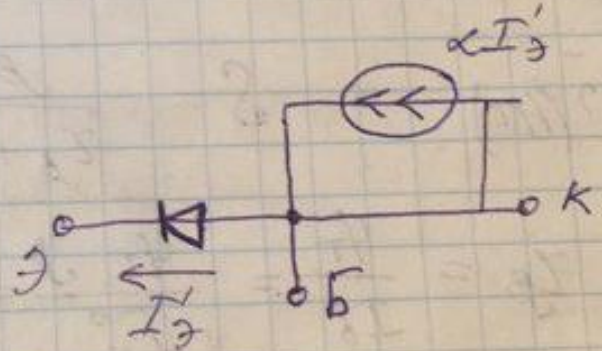
$$-U_{БК} + U_{БЭ} - U_{КЭ} = 0$$

$$U_{БК} = U_{БЭ} - U_{КЭ} = 0,65 - 10 = -9,35$$

$$U_{БК} < U_{КЭ} \quad \Rightarrow \quad \text{АО}$$

$$U_{БЭ} > U_{КЭ}$$

инжекц. модель в АО:



$$I_{Э} = I_{БЭ}' - \alpha I_{К}'$$

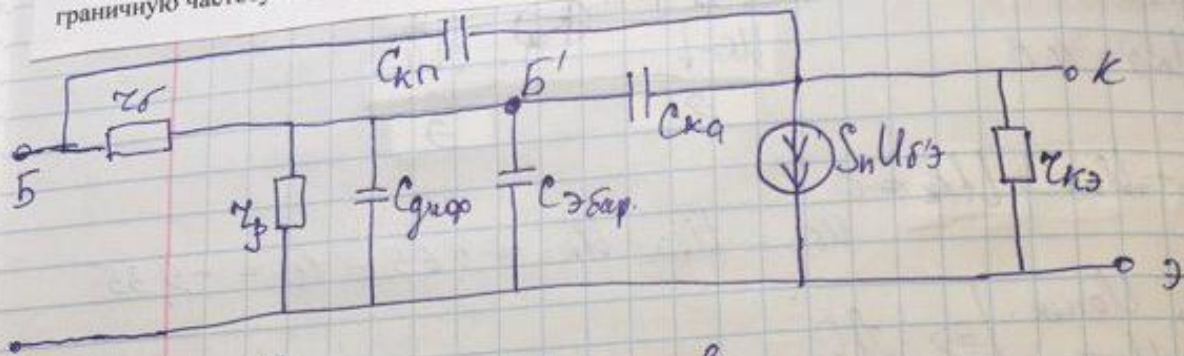
$$I_{К} = \alpha I_{БЭ}' - I_{К}'$$

$$I_{Э} = I_{Эs} \left( e^{U_{БЭ}'/U_T} - 1 \right) - \alpha I_{Кs} \left( e^{U_{БК}'/U_T} - 1 \right)$$

$$I_{К} = \alpha I_{Эs} / e^{U_{БК}'/U_T} - I_{Кs} / e^{U_{БК}'/U_T}$$



35. Изобразите малосигнальную ВЧ эквивалентную схему БТ для активной области (схему Джаколетто). Поясните физический смысл ее элементов. Для режима, в котором постоянный ток коллектора  $I_{K0} = 25 \text{ мА}$ ,  $C_{\text{Э}} = 2 \text{ пФ}$ ,  $C_{\text{КП}} = C_{\text{КА}} = 1 \text{ пФ}$ ,  $r_{\text{б}} = 50 \text{ Ом}$ ,  $\beta = 100$ , на  $f_0 = 100 \text{ МГц}$ ,  $|\beta(f_0)| = 20$  рассчитайте диффузионную емкость, крутизну по входу  $S$  на низкой частоте и граничную частоту по крутизне  $f_s$ . Поясните смысл этой частоты.



$$C_{\text{дифф}} - ?$$

$$S - ? (\text{Гц})$$

$$f_s - ?$$

$$S = \frac{\beta}{r_{\text{б}} + r_{\text{с}}}$$

$$r_{\text{б}} = \frac{\varphi_{\text{T}}}{I_{\text{б}}} = \frac{\varphi_{\text{T}}}{I_{\text{к}}} \beta = \frac{25 \cdot 10^{-3} \cdot 100}{25 \cdot 10^{-3}} = 100$$

$$S = \frac{\beta}{r_{\text{б}} + r_{\text{с}}} = \frac{100}{100 + 150} = \frac{100}{150} = 0,666$$

$$\frac{\omega_s}{\omega_{\text{б}}} = 1 + \frac{r_{\text{б}}}{r_{\text{с}}} \quad \omega_{\text{T}} = 2\pi f_{\text{T}}$$

$$f_{\text{T}} = f_0 |\beta(f_0)| = 100 \cdot 10^6 \cdot 20 = 2 \cdot 10^9 \text{ Гц}$$

$$2\pi f_s = \omega_{\text{б}} \left( 1 + \frac{r_{\text{б}}}{r_{\text{с}}} \right) = \frac{2\pi f_{\text{T}}}{\beta} \left( 1 + \frac{r_{\text{б}}}{r_{\text{с}}} \right)$$

$$\omega_{\text{б}} = \frac{\omega_{\text{T}}}{\beta} = \frac{2\pi f_{\text{T}}}{\beta}$$

$$f_s = \frac{f_{\text{T}}}{\beta} \left( 1 + \frac{r_{\text{б}}}{r_{\text{с}}} \right) = \frac{2 \cdot 10^9}{100} \left( 1 + \frac{100}{50} \right) = 6 \cdot 10^7 \text{ Гц}$$

$$S_{\text{н}} = \frac{\beta}{r_{\text{б}}} = \frac{100}{100} = 1; \quad C_{\text{дифф}} = \frac{S_{\text{н}}}{2\pi f_{\text{T}}} = \frac{1}{2\pi \cdot 2 \cdot 10^9} = 79,5 \text{ пФ}$$



$p-n-p$

$U_{\delta \text{ отк}} = -0,6 \text{ В}$   
 $U_{\delta \text{ зк}} = -0,6 \text{ В}$

БЭ переход закрыт  
 БК открыт

работает в ЧО.

$I_{\delta}$   
 $I_{\kappa}$   
 $\beta I I_{\delta}$

$U_{\delta}$   
 $I_{\delta}$   
 $\beta$

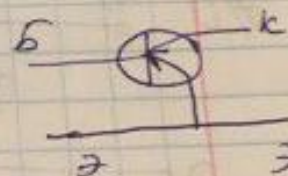
$I_{\delta} = I_{\text{эс}} \left( e^{\frac{U_{\delta \delta} / U_T}{}} - 1 \right) + I_{\kappa \text{ эс}} \left( e^{\frac{-U_{\kappa \delta} + U_{\delta \delta}}{U_T}} - 1 \right)$   
 $I_{\kappa} = \beta I_{\text{эс}} \left( e^{\frac{U_{\delta \delta} / U_T}{}} - 1 \right) - (\beta + 1) I_{\kappa \text{ эс}} \left( e^{\frac{-U_{\kappa \delta} + U_{\delta \delta}}{U_T}} - 1 \right)$

$I_{\delta}$   
 $I_{\kappa}$   
 $U_{\delta \delta}$   
 $U_{\kappa \delta}$

ОН  
 АО

ОН  
 АО

$I_{\delta}$   
 $I_{\kappa}$   
 $U_{\delta \delta}$



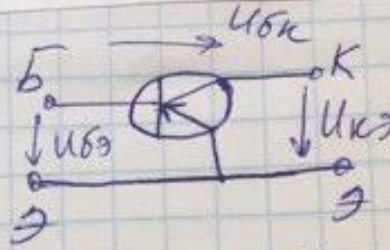


37. Определите в какой области работает Si p-n-p БТ, если  $U_{БЭ} = -0,65 \text{ В}$ ,  $U_{КЭ} = -10 \text{ В}$ . Нарисуйте передаточную модель БТ, описывающую работу БТ по постоянному току в этой области. Напишите уравнения для расчета входных, проходных и выходных характеристик БТ, включенного по схеме ОЭ. Изобразите входные и выходные характеристики для активной области и области насыщения характеристики.

характеристики.

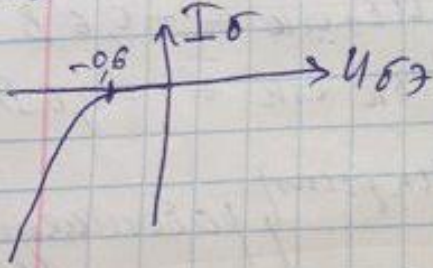
$$U_{БЭ \text{ отк}} = -0,6 \text{ В}$$

$$U_{БК \text{ отк}} = -0,6 \text{ В}$$

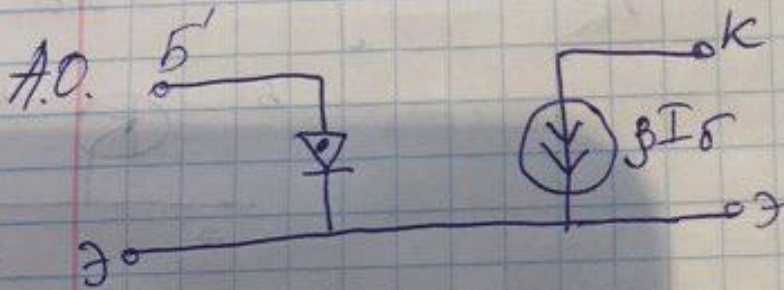


p-n-p

$$U_{КЭ} - U_{БЭ} + U_{БК} = 0 ; U_{БК} = U_{БЭ} - U_{КЭ} = -0,65 + 10 = 9,35$$



БЭ - открыт  
БК - закрыт  $\Rightarrow$  АО



$$I_Б = I_{ЭБС} \left( e^{\frac{U_{БЭ}}{U_T}} - 1 \right) + I_{КБС} \left( e^{\frac{-U_{КЭ} + U_{БЭ}}{U_T}} - 1 \right)$$

$$I_К = \beta I_{ЭБС} \left( e^{\frac{U_{БЭ}}{U_T}} - 1 \right) - (\beta + 1) I_{КБС} \left( e^{\frac{-U_{КЭ} + U_{БЭ}}{U_T}} - 1 \right)$$



38. Изобразите малосигнальную ВЧ эквивалентную схему БТ для активной области (схему Джиаклетто). Поясните физический смысл ее элементов. Для режима, в котором постоянный ток коллектора  $I_{K0} = 20$  мА,  $C_0 = 2$  пФ,  $C_{кп} = C_{ка} = 1$  пФ,  $r_0 = 50$  Ом,  $\beta = 50$ ,  $f_T = 500$  МГц, рассчитайте диффузионную емкость, крутизну по входу  $S$  на низкой частоте и граничную частоту по коэффициенту передачи по току  $|\beta|$   $f_\beta$ . Поясните смысл этой частоты.

$C_{диф} - ?$  ✓  
 $S - ?$  (нз) ✓  
 $f_\beta - ?$  ✓

$$S = \frac{\beta}{r_\beta + r_0}$$

$$r_\beta = \frac{U_T}{I_0} = \frac{U_T \beta}{I_{K0}} = \frac{25 \cdot 10^{-3} \cdot 50}{20 \cdot 10^{-3}} = 62,5$$

$$S = \frac{50}{62,5 + 50} = 0,444$$

$$C_{диф} = \frac{S_n}{2\pi f_T} ; S_n = \frac{\beta}{r_\beta} = \frac{50}{62,5} = 0,8$$

$$C_{диф} = \frac{0,8}{2\pi \cdot 500 \cdot 10^6} = 254,6 \text{ пФ}$$

$$f_\beta = \frac{f_T}{\beta} = \frac{500 \cdot 10^6}{50} = 1 \cdot 10^7 \text{ Гц}$$

$$\omega_T = \beta \omega_\beta ; f_T = \beta f_\beta$$



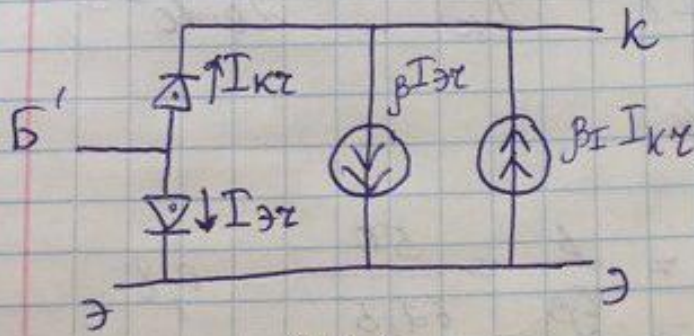
39. Определите в какой области работает Si p-n-p БТ, если  $U_{Б'Э} = -0,7$  В,  $U_{Б'К} = -1$  В. Нарисуйте передаточную модель БТ, описывающую работу БТ по постоянному току в этой области. Напишите уравнения для расчета входных, проходных и выходных характеристик БТ, включенного по схеме ОЭ. Изобразите выходные и проходные характеристики для активной области и области насыщения характеристики.

характеристики.

$$U_{Б'Э\text{отк}} = -0,6 \text{ В}$$

$$U_{Б'К\text{отк}} = -0,6 \text{ В}$$

БЭ - открыт }  
БК - открыт }  $\Rightarrow$  работает в ОН



$$\begin{cases} I_{\delta} = I_{\text{ЭБ}} / \left( e^{\frac{U_{Б'Э}}{\varphi_T}} - 1 \right) + I_{\text{КБ}} / \left( e^{\frac{-U_{КЭ} + U_{Б'Э}}{\varphi_T} - 1} \right) \\ I_{\text{К}} = \beta I_{\text{ЭБ}} / \left( e^{\frac{U_{Б'Э}}{\varphi_T}} - 1 \right) - (\beta + 1) I_{\text{КБ}} / \left( e^{\frac{-U_{КЭ} + U_{Б'Э}}{\varphi_T} - 1} \right) \end{cases}$$

$$\beta = \frac{I_{\text{К}}}{I_{\delta}}$$