

и затворе ($U_{зи} = 0$); емкости: затвор — сток $C_{зс}$, затвор — исток $C_{зи}$, сток — исток $C_{си}$, подложка — исток $C_{пи}$, граничную частоту $f_{гр} = 1/(2\pi\tau)$, где τ — постоянная времени цепи затвора.

Подобно биполярным транзисторам, полевые транзисторы используют в трех основных схемах включения: с общим истоком (ОИ), общим стоком (ОС) и общим затвором (ОЗ). Усилительный каскад по схеме ОИ аналогичен схеме ОЭ. Он дает большое усиление тока и мощности и инвертирует фазу входного напряжения. Коэффициент усиления каскада по напряжению приближенно равен $K_U \approx SR_H$.

Схема ОС подобна эмиттерному повторителю и называется истоковым повторителем. Коэффициент усиления каскада по напряжению близок к единице. Усилитель по схеме ОС имеет сравнительно небольшое выходное сопротивление и большое входное сопротивление. Кроме того, здесь значительно уменьшена входная емкость, что способствует увеличению входного сопротивления на высоких частотах.

Схема ОЗ аналогична схеме ОБ. Схема не усиливает тока, поэтому коэффициент усиления по мощности во много раз меньше, чем в схеме ОИ. Эта схема имеет малое входное сопротивление, так как входным током является ток стока. Фаза напряжения при усилении не инвертируется.

ПРИМЕРЫ

2.63. Показать, что если полевой транзистор с управляющим p - n -переходом работает при достаточно низком напряжении сток — исток, то можно представить его в виде резистора, сопротивление которого

$$R = R_0 [1 - (|U_{зи}|/U_{отс})^{1/2}]^{-1},$$

где R_0 — сопротивление канала при нулевом напряжении затвор — исток; $U_{отс}$ — напряжение отсечки; $U_{зи}$ — напряжение между затвором и истоком.

2.64. а) Удельная проводимость канала n -типа полевого транзистора $\sigma = 20,9$ См/м и ширина канала $w = 6$ мкм при напряжении затвор — исток, равном нулю. Найти напряжение отсечки $U_{отс}$, считая, что подвижность электронов $\mu_n = 0,13$ м²/(В·с), а относительная диэлектрическая проницаемость кремния $\epsilon = 12$. б) При напряжении затвора, равном нулю, сопротивление сток — исток равно 50 Ом. При каком напряжении затвора сопротивление сток — исток станет равным 200 Ом?

Решение

а) Удельная проводимость канала *n*-типа

$$\sigma = \mu_n e N_d$$

где N_d — концентрация примеси, μ_n — подвижность электронов. Следовательно,

$$N_d = \sigma / (\mu_n e) = 20,9 / (0,13 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}) = 10^{21} \text{ м}^{-3}.$$

Напряжение отсечки

$$U_{\text{отс}} = e N_d a^2 / (2 \epsilon \epsilon_0),$$

где a — половина ширины канала, когда напряжение затвор — исток $U_{\text{ЗИ}} = 0$. Отсюда

$$U_{\text{отс}} = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{21} (3,0 \cdot 10^{-6})^2 / (2 \cdot 12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}) = 6,8 \text{ В}.$$

б) Сопротивление сток — исток (см. задачу 2.63)

$$R_{\text{СИ}} = \frac{R_0}{1 - (|U_{\text{ЗИ}}| / 6,8)^{1/2}},$$

где R_0 — сопротивление сток — исток при $U_{\text{ЗИ}} = 0$. При $R_{\text{СИ}} = 200$ Ом имеем

$$200 = \frac{50}{1 - (|U_{\text{ЗИ}}| / 6,8)^{1/2}},$$

откуда $|U_{\text{ЗИ}}| = 3,83$ В (напряжение отрицательно относительно истока).

2.65. Полевой транзистор с управляющим *p-n*-переходом, имеющий $I_{\text{Сmax}} = 2$ мА и $S_{\text{max}} = 2$ мА/В, включен в усилительный каскад по схеме с общим истоком. Сопротивление резистора нагрузки $R_n = 10$ кОм. Определить коэффициент усиления по напряжению, если: а) $U_{\text{ЗИ}} = -1$ В; б) $U_{\text{ЗИ}} = -0,5$ В; в) $U_{\text{ЗИ}} = 0$.

Решение

а) Найдем напряжение отсечки:

$$U_{\text{отс}} = 2 I_{\text{Сmax}} / S_{\text{max}} = 2,2 \cdot 10^{-3} / (2 \cdot 10^{-3}) = 2 \text{ В}.$$

Определим крутизну характеристики транзистора при $U_{\text{ЗИ}} = -1$ В:

$$S = S_{\text{max}} (1 - |U_{\text{ЗИ}}| / U_{\text{отс}}) = 2 (1 - 1/2) = 1 \text{ мА/В}.$$

Коэффициент усиления по напряжению

$$|K_U| = S R_n = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^3 = 10.$$

б) При напряжении затвора $U_{зи} = -0,5$ В имеем

$$S = 2(1 - 0,5/2) = 1,5 \text{ мА/В};$$

$$|K_U| = 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3 \cdot 10 = 15.$$

в) При напряжении затвора, равном нулю,

$$S = 2(1 - 0/2) = 2 \text{ мА/В};$$

$$|K_U| = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^3 = 20.$$

2.66. У некоторого полевого транзистора с управляющим p - n -переходом $I_{C\max} = 1$ мА и $U_{отс} = 4$ В. Определить: а) какой ток будет протекать при обратном напряжении смещения затвор — исток, равном 2 В; б) чему равна крутизна и максимальная крутизна в этом случае?

Решение

а) Ток стока найдем из выражения

$$I_C = I_{C\max} (1 - |U_{зи}|/U_{отс})^2 = 1 \cdot 10^{-3} (1 - 2/4) = 0,25 \text{ мА}.$$

б) Крутизна характеристики полевого транзистора

$$S = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{зи}} = \frac{2I_{C\max}}{U_{отс}} \left(1 - \frac{|U_{зи}|}{U_{отс}}\right) = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{4} \left(1 - \frac{2}{4}\right) = 0,25 \text{ мА/В}.$$

Максимальная крутизна

$$S_{\max} = 2I_{C\max}/U_{отс} = 2 \cdot 10^{-3}/4 = 0,5 \text{ мА/В}.$$

2.67. В усилительном каскаде с общим истоком сопротивление нагрузки $R_n = 20$ кОм (рис. 2.42). Эффективное входное сопротивление полевого транзистора 20 кОм, рабочая крутизна $S = 2$ мА/В. Определить коэффициент усиления каскада.

Решение

Результирующее сопротивление нагрузки

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

Коэффициент усиления каскада

$$K_U = SR_n = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^3 = 20.$$

2.68. Истоковый повторитель (рис. 2.43) имеет ток стока $I_C = 5$ мА и $S = 2$ мА/В, $R_n = 500$ Ом, $U_{R_n} = U_{ис}$. Определить следующие величины: а) K_U ; б) $R_{вых}$; в) E_c .

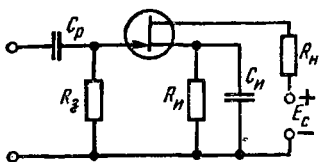


Рис. 2.42

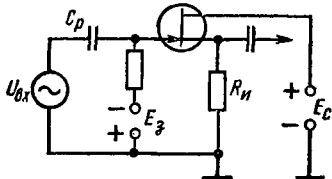


Рис. 2.43

Решение

Здесь

$$|K_U| = SR_N / (1 + SR_N) = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 500 / (1 + 2 \cdot 10^{-3} \cdot 500) = 0,5;$$

$$R_{\text{вых}} = R_N / (1 + SR_N) = 500 / (1 + 2 \cdot 10^{-3} \cdot 500) = 250 \text{ Ом};$$

$$U_{R_N} = I_C R_N = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 500 = 2,5 \text{ В}; \quad E_C = 2,5 + 2,5 = 5 \text{ В}.$$

2.69. В усилителе, схема которого показана на рис. 2.44, при $|U_{\text{зи}}| = 2 \text{ В}$ ток стока $I_C = 1 \text{ мА}$. Определить: а) сопротивление резистора R_N , если падением напряжения $I_C R_3$ можно пренебречь; б) напряжение E_C , если $R_N = 10 \text{ кОм}$, $U_{\text{си}} = 4 \text{ В}$.

Решение

Здесь:

$$\text{а) } R_N = |U_{\text{зи}}| / I_C = 2,0 / (1 \cdot 10^{-3}) = 2 \text{ кОм};$$

$$\text{б) } E_C = I_C R_N + U_{\text{си}} + I_C R_N = 10 + 4 + 2 = 16 \text{ В}.$$

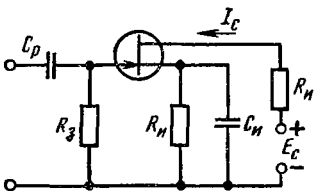


Рис. 2.44

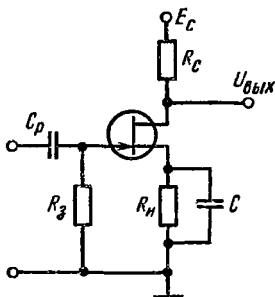


Рис. 2.45

2.70. Полевой транзистор с управляющим $p-n$ -переходом и каналом n -типа используется в усилительном каскаде (рис. 2.45). Напряжение отсечки транзистора $U_{\text{отс}} = -2 \text{ В}$, максимальный ток стока $I_{\text{Сmax}} = 1,8 \text{ мА}$. Известно, что при напряжении источника питания $E_C = 20 \text{ В}$ ток стока $I_C = 1 \text{ мА}$. Модуль коэффициента усиления усилителя по напряжению $|K_U| = 10$. Опреде-

лить: а) напряжение затвор – исток $U_{зи}$; б) крутизну транзистора в рабочей точке S ; в) сопротивление резистора в цепи истока $R_{и}$; г) сопротивление нагрузки в цепи стока $R_{с}$. Предположить, что внутреннее сопротивление транзистора $R_i \gg R_{с}$ и что на рабочей частоте емкостное сопротивление конденсатора C пренебрежимо мало.

Решение

а) Определим напряжение затвор – исток $U_{зи}$, используя выражение

$$I_C = I_{C_{\max}} (1 - |U_{зи}|/U_{отс})^2.$$

Подставляя значения, данные в условии задачи, получаем

$$1 \cdot 10^{-3} = 1,8 \cdot 10^{-3} (1 - |U_{зи}|/2)^2, \text{ откуда } |U_{зи}| = 0,5 \text{ В.}$$

б) Найдем максимальную крутизну характеристики прибора:

$$S_{\max} = 2I_{C_{\max}}/U_{отс} = 2 \cdot 1,8 \cdot 10^{-3}/2 = 1,8 \text{ мА/В.}$$

Следовательно, крутизна транзистора в рабочей точке

$$S = S_{\max} (1 - |U_{зи}|/U_{отс}) = 1,8 \cdot 10^{-3} (1 - 0,5/2) = 1,35 \text{ мА/В.}$$

в) Вычислим сопротивление резистора в цепи истока:

$$R_{и} = |U_{зи}|/I_C = 0,5/(1 \cdot 10^{-3}) = 0,5 \text{ кОм.}$$

г) Учитывая, что $R_i \gg R_{с}$, сопротивление резистора в цепи стока найдем из выражения $|K_U| = SR_{с}$, откуда

$$R_{с} = |K_U|/S = 10/(1,35 \cdot 10^{-3}) = 7,4 \text{ кОм.}$$

2.71. В МДП-транзисторе с каналом n -типа ширина затвора 0,8 мм, длина канала $l = 5$ мкм, толщина слоя диэлектрической изоляции (оксидного) $d = 150$ нм, подвижность электронов в канале $\mu_n = 0,02 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, относительная диэлектрическая проницаемость оксидной пленки $\epsilon = 3,7$, напряжение сток – исток в пологой части характеристики (при насыщении) $U_{си} = 8$ В. Определить крутизну характеристики прибора в пологой области стоковой ВАХ.

Решение

Крутизну прибора в области насыщения вычислим по следующей формуле:

$$S = \mu_n C_3 U_{си} / l^2,$$

где μ_n – подвижность электронов в канале; C_3 – емкость затвора; l – длина канала; $U_{си}$ – напряжение сток – исток при насыщении.

Определим емкость затвора:

$$C_3 = \epsilon \epsilon_0 \Pi / d = 3,7 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-6} / (150 \cdot 10^{-9}) = 0,87 \text{ пФ.}$$

Следовательно, крутизна характеристики

$$S = 0,02 \cdot 0,87 \cdot 10^{-12} \cdot 8 / (5 \cdot 10^{-6})^2 = 5,6 \text{ мА/В.}$$

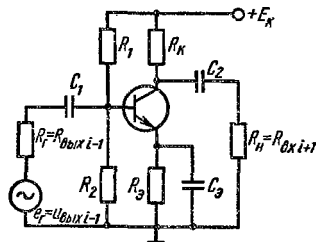
ГЛАВА 3

МНОГОКАСКАДНЫЕ УСИЛИТЕЛИ С РЕОСТАТНО-ЕМКОСТНЫМИ СВЯЗЯМИ

В многокаскадных усилителях с реостатно-емкостными связями источником сигнала для i -го промежуточного каскада является выходная цепь предыдущего каскада, а нагрузкой — входная цепь последующего.

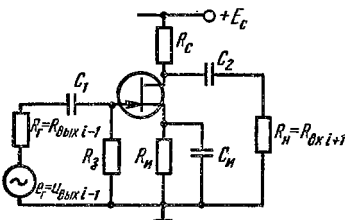
Типовые схемы промежуточных каскадов с включением биполярного или полевого транзистора по схеме ОЭ (ОИ) изображены на рис. 3.1 и 3.2 соответственно. Они содержат переходные конденсаторы C_1 и C_2 и блокирующий конденсатор C_3 ($C_{и}$).

Конденсатор C_1 пропускает во входную цепь промежуточного каскада переменную составляющую напряжения источника сигнала и не пропускает постоянную составляющую. Конденсатор C_2 выполняет аналогичную функцию по отношению к нагрузке и выходной цепи промежуточного каскада. Конденсатор C_3 ($C_{и}$) шунтирует резистор R_3 ($R_{и}$) по перемен-



i -й каскад

Рис. 3.1



i -й каскад

Рис. 3.2

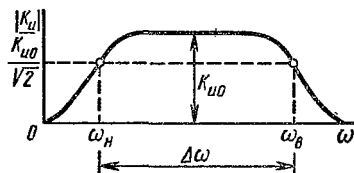


Рис. 3.3