

дующие значения h -параметров: $h_{113} = 500 \text{ Ом}$, $h_{123} = 10^{-7}$, $h_{213} = 100$, $h_{223} = 50 \text{ мкСм}$.

Вычислить все параметры гибридной схемы замещения, если $f_{гр} = 50 \text{ МГц}$ и $C_k = 3 \text{ пФ}$.

Решение

Гибридная схема замещения изображена на рис. 2.38. При расчете ее параметров учтем, что $g_s = I_K / \varphi_T$, где I_K — ток коллектора в рабочей точке, $\varphi_T = kT/e$ — температурный потенциал.

В рассматриваемом случае

$$g_s = 10 \cdot 10^{-3} / (25,8 \cdot 10^{-3}) = 0,388 \text{ См};$$

$$r_{6'3} = 1/g_{6'3} = h_{213}/g_s = h_{213}\varphi_T/I_K = 100/0,388 = 258 \text{ Ом};$$

$$r_{66'} = h_{113} - r_{6'3} = 500 - 258 = 242 \text{ Ом};$$

$$r_{6'к} = 1/g_{6'к} = r_{6'3}/h_{123} = 258/10^{-4} = 2,58 \text{ МОм};$$

$$g_{к3} = 1/r_{к3} = h_{223} - (1 + h_{213})g_{6'к} = \\ = 50 \cdot 10^{-6} - 101 \cdot 0,388 \cdot 10^{-6} = 10,8 \cdot 10^{-6} \text{ См};$$

$$r_{к3} = 1/g_{к3} = 92,5 \text{ кОм};$$

$$C_3 = g_s / (2\pi f_{гр}) = 0,388 / (2\pi \cdot 50 \cdot 10^6) = 1235 \cdot 10^{-12} = 1235 \text{ пФ}.$$

§ 2.2. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Полевые транзисторы представляют собой полупроводниковые приборы, в которых управление током, протекающим между двумя электродами, осуществляется с помощью напряжения, приложенного к третьему электроду. Их работа основана на перемещении только основных носителей заряда, т. е. дырок или электронов.

Управление током в них осуществляется за счет изменения удельной проводимости и площади полупроводникового слоя (канала), через который проходит рабочий ток, с помощью электрического поля. Электрод полевого транзистора, через который втекают носители заряда в канал, называется истоком (И), а электрод, через который из канала вытекают носители заряда, называется стоком (С). Эти электроды обратимы. С помощью напряжения, прикладываемого к третьему электроду, называемому затвором (З), осуществляют перекрытие канала, т. е. изменяют удельную проводимость и площадь сечения канала.

По конструктивным особенностям полевые транзисторы разделяют на транзисторы с управляющим p - n -переходом

транзисторы с изолированным затвором (структуры металл — диэлектрик — полупроводник, МДП- или МОП-транзисторы).

В полевом транзисторе с управляющим *p-n*-переходом управляющая область (затвор) образует *p-n*-переход с областью канала. При подаче на переход затвор — канал обратного напряжения происходит модуляция удельной проводимости канала, а следовательно, изменение тока канала.

МДП- или МОП-транзистор представляет собой прибор, в котором металлический затвор изолирован слоем диэлектрика от канала, образованного в приповерхностном слое полупроводника. Принцип действия МДП транзистора основан на явлении управления пространственным зарядом полупроводника через слой диэлектрика.

Различают МДП-транзисторы с индуцированным и со встроенным каналом. В МДП-транзисторах с индуцированным каналом проводящий канал между истоком и стоком индуцируется (наводится) управляющим напряжением затвора. В этих транзисторах при разности потенциалов между истоком и затвором, равной нулю, электропроводность между стоком и истоком практически отсутствует.

В МДП-транзисторах со встроенным каналом этот канал создается технологически. В зависимости от типа электропроводности канала МДП-транзисторы могут быть *p*- или *n*-типа. Наибольшее распространение получили МДП-транзисторы с индуцированным каналом *p*-типа и со встроенным каналом *n*-типа. Тип электропроводности истока и стока всегда совпадает с типом электропроводности канала.

Из всех видов полевых транзисторов только транзистор с индуцированным каналом при нулевом напряжении на затворе не проводит тока. Транзистор со встроенным каналом может проводить ток как при положительном, так и при отрицательном смещении. Для его запираения необходимо положительное смещение при дырочной электропроводности канала и отрицательное смещение при электронной электропроводности (полярность запирающего напряжения совпадает со знаком заряда основных носителей в канале).

Управление транзисторов с управляющим *p-n*-переходом и с индуцированным каналом осуществляется путем подачи на затвор потенциала только одной полярности. Транзистор с управляющим *p-n*-переходом работает с отрицательным смещением в случае канала *n*-типа и положительным смещением, если создан канал *p*-типа.

В транзисторах с индуцированным каналом для создания канала *n*-типа следует подавать на затвор положительное

смещение, а для наведения канала p -типа — отрицательное смещение.

Для нормальной работы полевых транзисторов к стоку подключается источник напряжения положительным полюсом для транзисторов с каналом n -типа и отрицательным — для транзисторов с каналом p -типа (независимо от структуры транзистора).

Полевые транзисторы обладают существенными преимуществами по сравнению с биполярными транзисторами. Одним из основных достоинств полевого транзистора является его высокое входное сопротивление ($10^6 - 10^7$ Ом — у транзисторов с управляющим p - n -переходом и $10^{10} - 10^{15}$ Ом у МДП-транзисторов). Они более устойчивы к воздействию ионизирующих излучений, хорошо работают и при очень низкой температуре вплоть до температуры жидкого азота (-197°C). Кроме того, они характеризуются низким уровнем шумов. МДП-транзисторы широко применяются в интегральных микросхемах.

Вольт-амперные характеристики полевых транзисторов. Полевые транзисторы описываются двумя ВАХ: стоковой — $I_C = f(U_{СИ}) | U_{ЗИ} = \text{const}$ и стокзатворной — $I_C = f_1(U_{ЗИ}) | U_{СИ} = \text{const}$.

Полярность включения напряжения стока, стоковая и стокзатворная ВАХ полевого транзистора с управляющим p - n -переходом и каналом n -типа показаны на рис. 2.39, а, б, в соответственно. На рис. 2.40, а, б, в приведены полярность включения напряжения стокового источника питания, стоковая и стокзатворная ВАХ для МДП-транзистора со встроенным каналом. Полярность включения напряжения стока, стоковая и стокзатворная ВАХ для МДП-транзистора с индуцированным каналом n -типа изображены на рис. 2.41, а, б, в соответственно.

На характеристиках отчетливо видны две области работы полевых транзисторов:

область I — область нарастания тока стока при увеличении напряжения (омическая область);

область II — область активной работы транзистора на пологом участке стоковой ВАХ. При работе в этой области канал открыт и стоковое напряжение $U_{СИ}$ превышает по абсолютному значению напряжение перекрытия канала. Ток стока практически не зависит от напряжения $U_{СИ}$.

Отсечка тока стока наблюдается в том случае, когда напряжение на затворе по абсолютному значению превышает напряжение отсечки $U_{ЗИотс}$ (для транзисторов с управляющим p - n -переходом и со встроенным каналом) или пороговое напряжение $U_{ЗИпор}$ (для транзисторов с индуцированным каналом).

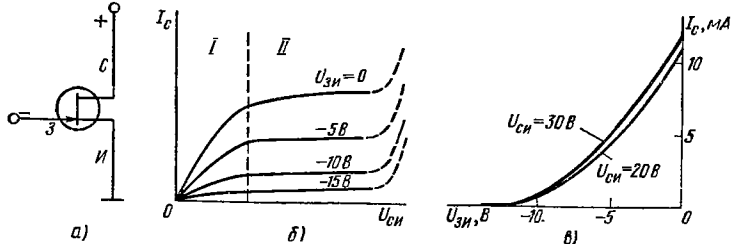


Рис. 2.39

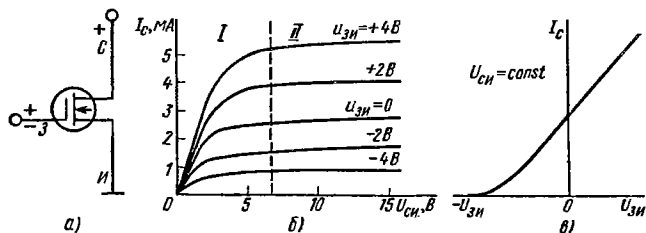


Рис. 2.40

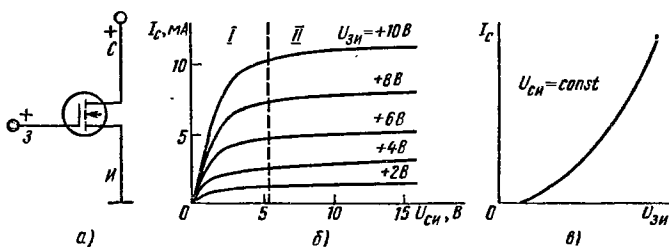


Рис. 2.41

Для полевого транзистора с управляющим p - n -переходом, работающего в омической области, т. е. при напряжении $U_{СИ} < |U_{отс}| - |U_{ЗИ}|$, стоковая характеристика описывается уравнением

$$I_C = I_{Снас0} = \left[2 \frac{U_{СИ}}{U_{отс}} \left(1 - \frac{U_{ЗИ}}{U_{отс}} \right) - \left(\frac{U_{СИ}}{U_{отс}} \right)^2 \right], \quad (2.30)$$

где $I_{Снас0}$ — ток насыщения стока при $U_{ЗИ} = 0$. При напряжении $|U_{СИ}| = |U_{отс}| - |U_{ЗИ}|$, ток стока I_C достигает максимального значения. В пологой части характеристики, когда $|U_{СИ}| >$

$> U_{отс} - U_{зи}$, ток стока определяется соотношением

$$I_C = I_{Cнас0} \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{отс}} \right)^2. \quad (2.31)$$

Стокзатворная характеристика на пологом участке также описывается последним уравнением.

Параметры полевых транзисторов. Одним из основных параметров полевого транзистора, характеризующего его усиительные свойства, является крутизна стокзатворной характеристики:

$$S = dI_C/dU_{зи} |_{U_{си} = const}$$

Она определяет влияние изменения напряжения на затворе на изменение тока стока. Числовое значение крутизны зависит от напряжения на затворе. С увеличением $U_{зи}$ ток стока и крутизна уменьшаются. Для пологой части стоквой характеристики крутизну определяют из соотношения

$$S = S_{max} \left(1 - \frac{|U_{зи}|}{|U_{отс}|} \right), \quad (2.32)$$

где $S_{max} = 1/R_{к0}$ максимальная крутизна при $U_{зи} = 0$; $R_{к0}$ — минимальное сопротивление канала при $U_{зи} = 0$.

К параметрам полевых транзисторов также относится внутреннее сопротивление транзистора, определяемое как отношение изменения напряжения стока к соответствующему изменению тока стока при постоянном напряжении на других электродах:

$$R_i = \frac{dU_{си}}{dI_C} \Big|_{U_{зи} = const}$$

Коэффициент усиления транзистора μ определяется отношением приращений напряжения стока и затвора при холостом ходе на стоке:

$$\mu = \left| \frac{dU_{си}}{dU_{зи}} \right|_{I_C = const}$$

Параметры S_i , R_i и μ связаны между собой соотношением $\mu = SR_i$.

Цепь затвора характеризуют входным сопротивлением транзистора

$$R_{вх} = \frac{dU_{зи}}{dI_3} \Big|_{U_{си} = const}$$

В качестве параметров указывают также напряжение отсечки $U_{отс}$; ток насыщения стока $I_{Cнас0}$ при короткозамкнутых истоке

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?