МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Б.М.Симонов, А.В. Заводян

Изучение конструкций и характеристик биполярных транзисторов интегральных микросхем

Лабораторная работа № 7

Методические указания к лабораторному практикуму по курсам «Физические основы микроэлектроники», «Физические основы элементной базы ЭВС», ТИКИМС

Утверждено редакционно-издательским советом института

Москва 2004

Рецензент докт. техн. наук, проф. *В.Б. Кольцов*

Симонов Б.М., Заводян А.В.
Лабораторная работа № 7 "Изучение конструкций и характеристик биполярных транзисторов интегральных микросхем". - М.: МИЭТ, 2005. - 32 с.

В работе содержатся сведения по конструкциям, принципам функционирования, схемам включения, режимам работы, характеристикам и параметрам биполярных транзисторов полупроводниковых микросхем.

Даны методические указания к выполнению лабораторного задания, подробно описан порядок выполнения практической части работы. Приведены контрольные вопросы и список рекомендуемой литературы, с помощью которых можно проверить, закрепить и углубить полученные знания.

Лабораторная работа предназначена для студентов технических факультетов.

ã **МИЭТ, 2005**

Лабораторная работа № 7

Симонов *Борис Михайлович,*
Заводян *Алиса Викторовна*

Изучение конструкций и характеристик биполярных транзисторов интегральных микросхем

Редактор *Л.М.Рогачёва*. Технический редактор *Е.Н.Романова*. Корректор *Л.Г.Лосякова*

Подписано в печать с оригинала-макета 04.02. 2004. Формат 60x84 1/16. Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л.1,8. Уч.-изд. л. 1,6. Тираж 300 экз. Заказ 31.

Отпечатано в типографии ИПК МИЭТ.
124498, Москва, МИЭТ.

Цель работы: изучение принципа действия, статических характеристик и конструктивных особенностей биполярных транзисторов полупроводниковых микросхем (ПМС).

Продолжительность работы - 4 ч.

Аппаратура

Для выполнения работы используется следующая аппаратура:

1) лабораторный макет;
2) осциллограф универсальный С1-65А;
3) микроскоп ММУ-3 (см. Инструкцию по правилам обращения с микроскопом ММУ-3);
4) кассета с образцами.

Теоретические сведения

Биполярный транзистор относится к базовым элементам интегральных схем (микросхем). Именно на основе структуры базового элемента строятся структуры и всех остальных элементов микросхем.
С помощью биполярного транзистора удается осуществлять сложные преобразования электрических сигналов. Функциональные возможности электронных средств (ЭС), построенных на основе биполярных транзисторов, высоки. Поэтому актуальной является задача изучения физических процессов, протекающих в транзисторе, что позволит находить наиболее эффективные пути его применения в ЭС.

Принцип работы биполярного транзистора

Биполярный транзистор (БТ) - это полупроводниковый усилительный прибор, способный усиливать мощность полезных электрических сигналов.

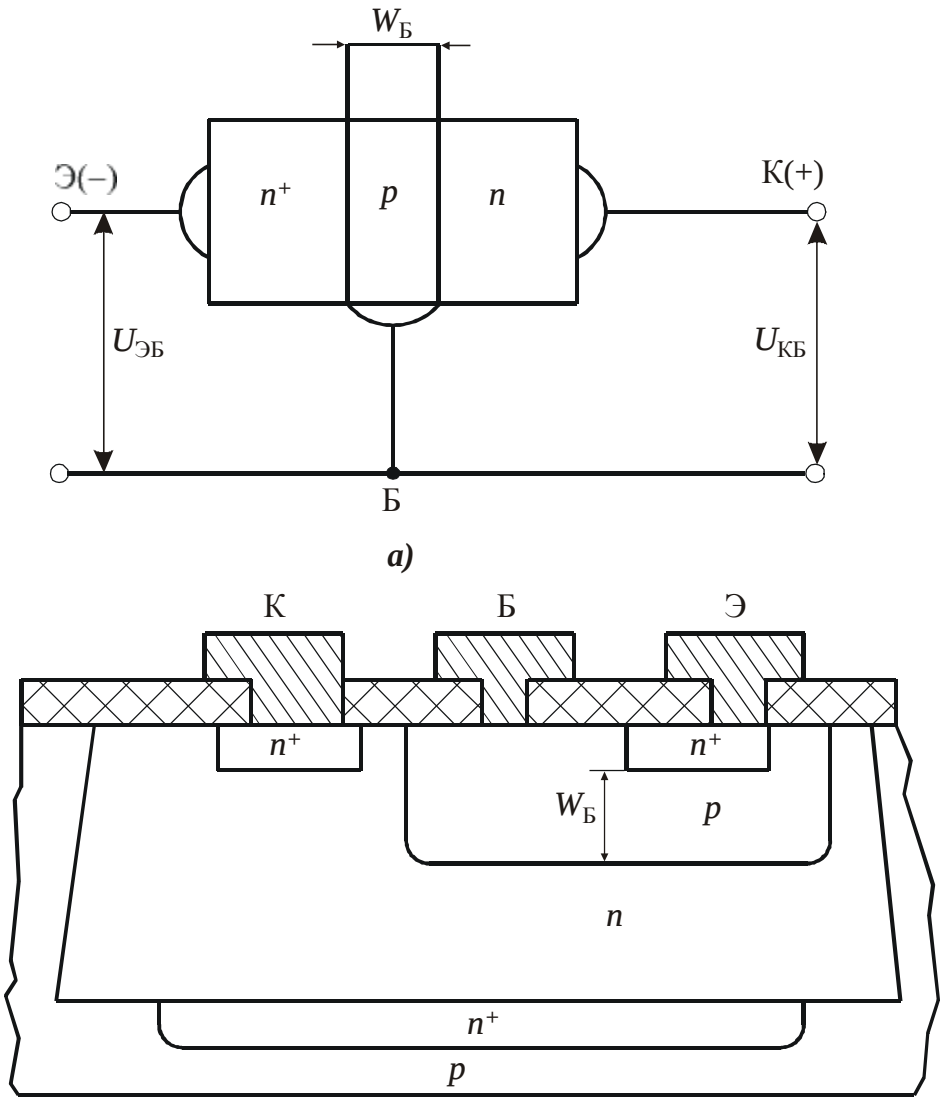


Рис.1. Модель (*а*) и конструкция биполярного транзистора (*б*) ПМС, выполненного по планарно-эпитаксиальной технологии

Биполярный транзистор представляет собой структуру с двумя p – n-переходами, которые взаимодействуют между собой благодаря тому, что они расположены друг относительно друга на расстоянии $W_Б$, меньшем диффузионной длины носителей заряда L, т.е. $W_Б < L$. Модель и конструкция биполярного транзистора, выполненного по планарно-эпитаксиальной технологии, показаны на рис.1,*а*,*б*.Биполярный транзистор управляется током, а режимы его работы определяются потенциалами на p – n-переходах база - эмиттер и база - коллектор.

Различают 5 режимов работы транзистора (табл.1):

1) нормальный активный; в этом случае p – n-переход эмиттер - база (ЭБ) смещен в прямом направлении, а p – n-переход коллектор - база (КБ) - в обратном;

Таблица 1

Режимы работы транзистора и примеры их практического использования

Режим работы транзистора	Включение перехода эмиттер - база	Включение перехода база - коллектор	Выполняемые функции	Примечания
Нормальный активный	Прямое	Обратное	Усиление, генерация, переключение и др.	-
Насыщения	То же	Прямое	Переключение, ограничение и др.	Переключается в режим отсечки
Инверсный	Обратное	То же	Инвертирование и др.	-
Отсечки	То же	Обратное	Переключение и др.	Переключается в режим насыщения
Лавинного умножения	Прямое	То же при больших $U_К$	Усиление, генерация, переключение и др.	Редко используется из-за нестабильности процесса лавинного умножения

2) инверсный, при котором переход ЭБ включен в обратном направлении, а переход КБ - в прямом;

3) режим насыщения; оба p – n-перехода транзистора включены в прямом направлении;

4) режим отсечки; оба p – n-перехода включены в обратном направлении;

5) режим пробоя (лавинного умножения); он может быть получен при нормальном активном режиме работы транзистора, если на коллектор подано достаточно большое напряжение.

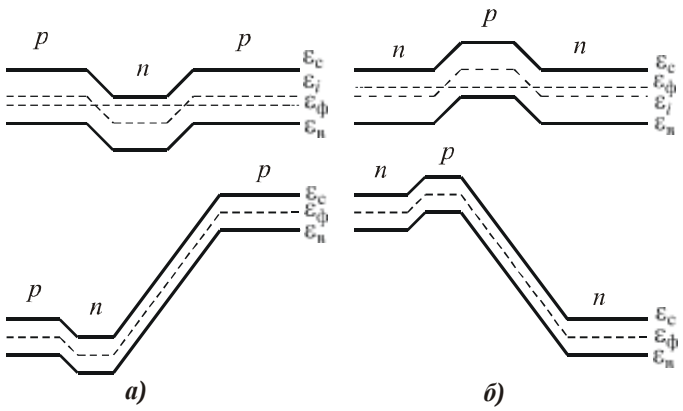


Рис.2. Энергетические диаграммы биполярных транзисторов: $p – n – p$-транзистора в равновесном состоянии и в нормальном активном режиме (*а*); $n – p – n$-транзистора в равновесном состоянии и в нормальном активном режиме (*б*)

Поскольку в интегральных микросхемах в основном используются структуры $n-p-n$-транзисторов, то целесообразно рассматривать именно эти транзисторы. В равновесном состоянии на обоих $p-n$-переходах имеется динамическое равновесие между потоками электронов (а также между потоками дырок), протекающих и в ту и в другую сторону. Нормальное включение транзистора приводит к уменьшению потенциального барьера эмиттерного перехода и к увеличению барьера коллекторного перехода (рис.2). Электроны инжектируются из эмиттера в базу, проходят ее почти без рекомбинации (поскольку ширина базы мала) и достигают коллекторного $p-n$-перехода. Электрическое поле коллектора захватывает электроны, которые являются в базе p-типа неосновными носителями заряда, и переносит их в коллекторную область транзистора. При включении, соответствующем нормальному активному режиму, коллектор будет собирать только электроны. Для получения эффекта усиления важно, чтобы ток эмиттера и коллектора содержал в основном электронную составляющую. Именно поэтому эмиттер легируют значительно сильнее (n^+), чем базу, с тем, чтобы добиться высокого уровня инжекции электронов из эмиттерной области.

Как видно из рис.2, сопротивление коллекторного перехода при нормальном включении велико (несколько мегаом), поэтому в цепь коллектора можно включить большое сопротивление нагрузки, не изменяя величины коллекторного тока. В цепи нагрузки при этом может выделяться значительная мощность. Сопротивление эмиттерного перехода при токе в 1 мА составляет около 20 Ом·см.

У транзисторов в активном режиме для всех трех схем включения: с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ) и с общим коллектором (ОК) - выполняется следующее важное соотношение между токами:

$$I_Э = I_К + I_Б. \qquad (1)$$

При этом ток базы определяется малыми рекомбинационными потерями носителей, инжектированных из эмиттера в базу, из-за чего ток базы составляет весьма малую долю тока эмиттера: $I_Б \approx 0{,}01 - 0{,}001 I_Э$. Таким образом, если пренебречь рекомбинационными процессами в базе, то можно считать, что токи эмиттера и коллектора одинаковы ($I_Э \approx I_К$). Следовательно, при одинаковых токах, но значительно отличающихся сопротивлениях эмиттерного и коллекторного переходов ($R_{вх} << R_{вых}$ и $U_{вх} << U_{вых}$) мощность, потребляемая в цепи эмиттера $P_{вх}$, будет несравнимо меньше, чем мощность, выделяемая в цепи нагрузки $P_{вых}$:

$$P_{вх} = U_{вх} I_Э << U_{вых} I_К = P_{вых}.$$

Таким образом, в биполярных транзисторах $P_{вых} >> P_{вх}$, что и является условием усиления по мощности.

Схемы включения транзистора показаны на рис.3. Включение транзистора с ОБ и ОЭ используется в усилительных, переключающих, логических и других схемах, причем включение с ОЭ на практике применяют чаще, особенно в высокочастотных схемах.

Включение транзистора с ОК используют реже, в основном для согласования высокоомного источника питания с низкоомной нагрузкой.

В схеме с ОБ (рис.3,*а*) задаются напряжения на эмиттере и коллекторе относительно базы. В этом случае входное сопротивление будет наименьшим ($R_{вх}$ - min), а выходное - наибольшим ($R_{вых}$ - max). Следовательно, усиление по току является наименьшим, по напряжению - наибольшим. В схеме с общим эмиттером (рис.3,*б*) $R_{вх}$ мало, усиление по току и по напряжению среднее, при этом максимально усиление по мощности. В схеме с ОК (рис.3,*в*) $R_{вх}$ максимально, $R_{вых}$ минимально, усиление по току наибольшее, усиление по напряжению наименьшее.

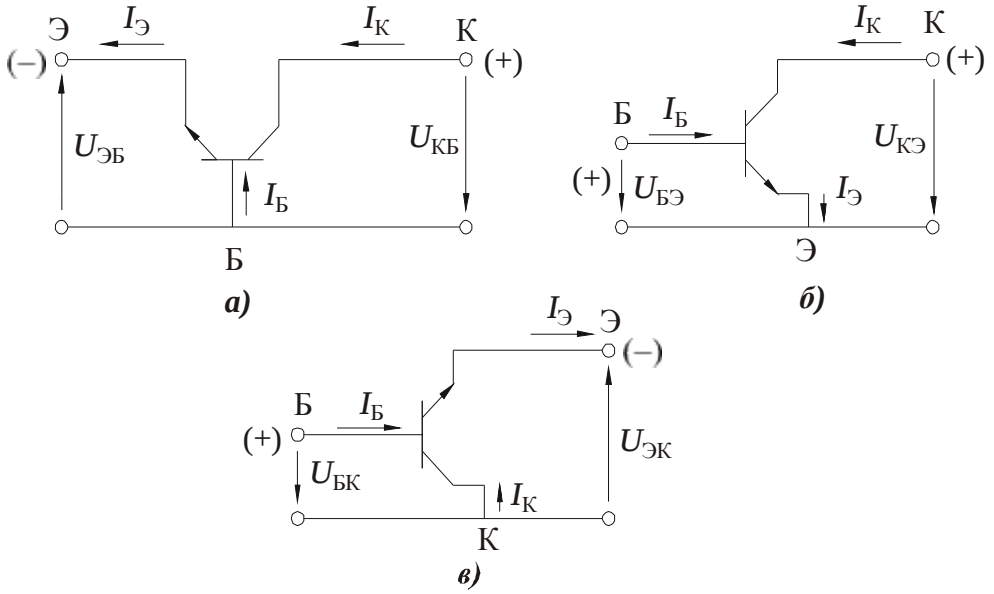


Рис.3. Схемы включения транзисторов $n-p-n$-типа: с общей базой (*а*); с общим эмиттером (*б*); с общим коллектором (*в*)

Статические параметры транзистора

Связь между токами в транзисторе может быть представлена с помощью ряда параметров:

α - коэффициент усиления (передачи) эмиттерного тока, один из основных параметров транзистора:

$$\alpha = \left.\frac{I_{вых}}{I_{вх}}\right|_{U_{вых}=\text{const}} = \left.\frac{I_К}{I_Э}\right|_{U_{КБ}=\text{const}} \approx 0{,}99-0{,}995; \qquad (2)$$

γ - коэффициент инжекции эмиттера, определяющий долю электронного тока $I_{Эn}$ в общем токе эмиттера ($I_Э = I_{Эn} + I_{Эp}$):

$$\gamma = \left.\frac{I_{Эn}}{I_Э}\right|_{U_{КБ}} \approx 0{,}999; \qquad (3)$$

β - коэффициент переноса эмиттерного тока, показывающий, какая часть электронов, инжектированных из эмиттера, дошла до коллектора и составила коллекторный ток:

$$\beta^* = \left.\frac{I_{Кn}}{I_{Эn}}\right|_{U_{КБ}} \approx 0{,}99; \qquad (4)$$

α^* - коэффициент характеризующий эффективность коллектора. Он определяет, насколько увеличился коллекторный ток за счет поступивших в коллектор электронов:

$$\alpha^* = \left.\frac{I_К}{I_{Кn}}\right|_{U_{КБ}=\text{const}}. \qquad (5)$$

Взаимосвязь этих коэффициентов выражается как

$$\alpha = \gamma\beta^*\alpha^*. \qquad (6)$$

В схеме ОБ входным (управляющим) током является ток эмиттера. В ней $\alpha < 1$, так как $I_К < I_Э$ (1).

В схеме ОЭ входным (управляющим) током является ток базы. Коэффициент усиления базового тока $\beta >> 1$ и определяется как

$$\beta = \left.\frac{I_{вых}}{I_{вх}}\right|_{U_{вых}=\text{const}} = \left.\frac{I_К}{I_Б}\right|_{U_{КЭ}} = \frac{\alpha}{1-\alpha}; \qquad (7)$$

$\beta >> 1$, так как $I_Б << I_К$. Параметры (2) - (7) - малосигнальные, для больших токов и напряжений в этих выражениях надо использовать не сами токи, а их приращения. Кроме того, к статическим параметрам транзистора можно отнести его дифференциальное сопротивление и крутизну. Крутизна $S \approx \Delta I / \Delta U$.

Статические ВАХ биполярных транзисторов

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) дают представление о свойствах транзистора при различных сочетаниях его токов и напряжений. С помощью ВАХ можно не только определить основные параметры транзистора и рассчитать нелинейные искажения сигнала, но и выявить некоторые дефекты транзисторов при их изготовлении. На рис.4 и 5 представлены соответственно статические входные и выходные ВАХ $n - p - n$-транзистора для схем включения с ОБ и ОЭ. А на рис.6 и 7 представлены модели, поясняющие режимы работы транзистора в точках, обозначенных на выходных характеристиках рис.5. Стрелками на рис.6 и 7 обозначены наиболее характерные потоки носителей заряда, пропорциональные соответствующим токам. При этом не все физические процессы, протекающие в транзисторах, отражены. Так, например, для входной ВАХ $n - p - n$-транзистора ход характеристики в начале координат (режим микротоков) дается без объяснения (для общей информации).

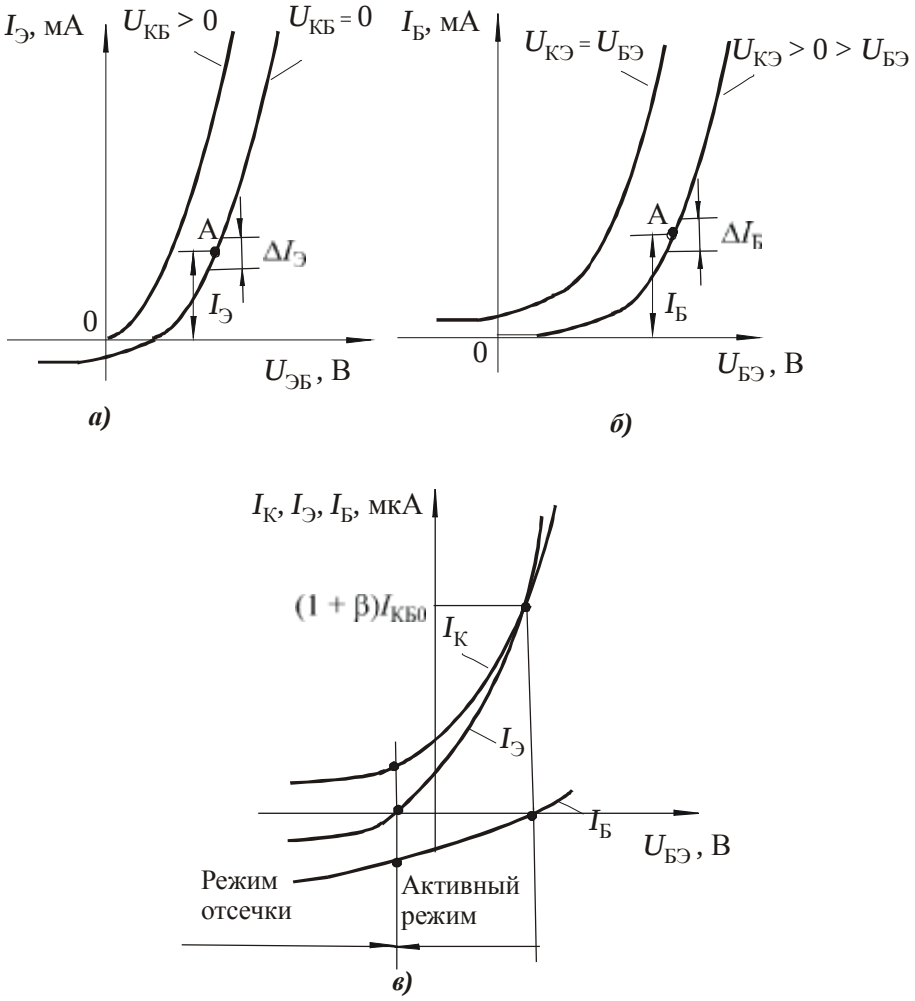
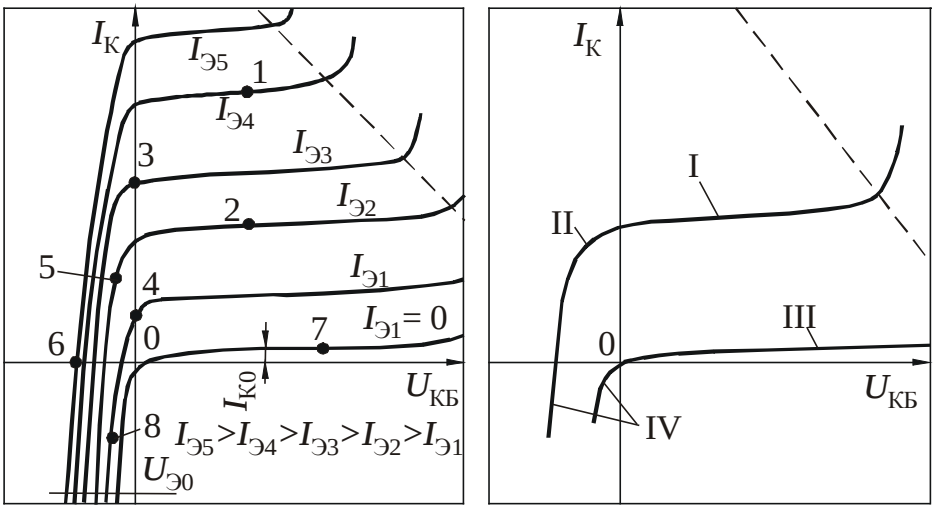
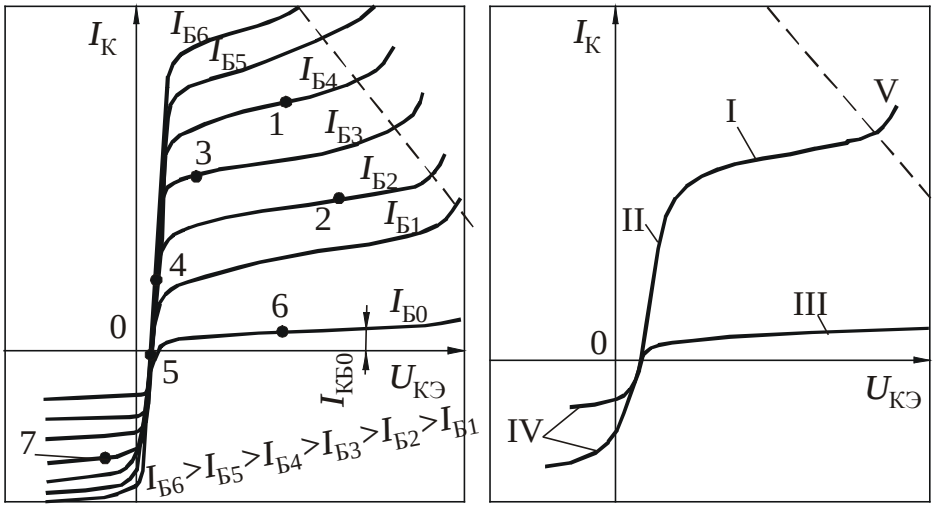


Рис.4. Входные ВАХ транзистора для схем включения с ОБ (*а*) и с ОЭ (*б*) и зависимости $I_К$, $I_Э$ и $I_Б$ от $U_{БЭ}$ при малых токах и обратном смещении коллекторного перехода (*в*)



а)



б)

Рис.5. Выходные ВАХ транзистора для схем включения с ОБ (*а*) и ОЭ (*б*). Точки 1 - 8 выбраны для анализа работы транзистора. На отдельных ВАХ указаны режимы работы транзистора для обеих схем включения: I - активный; II - насыщения; III - отсечки; IV - инверсный; V - лавинного умножения (пробоя)

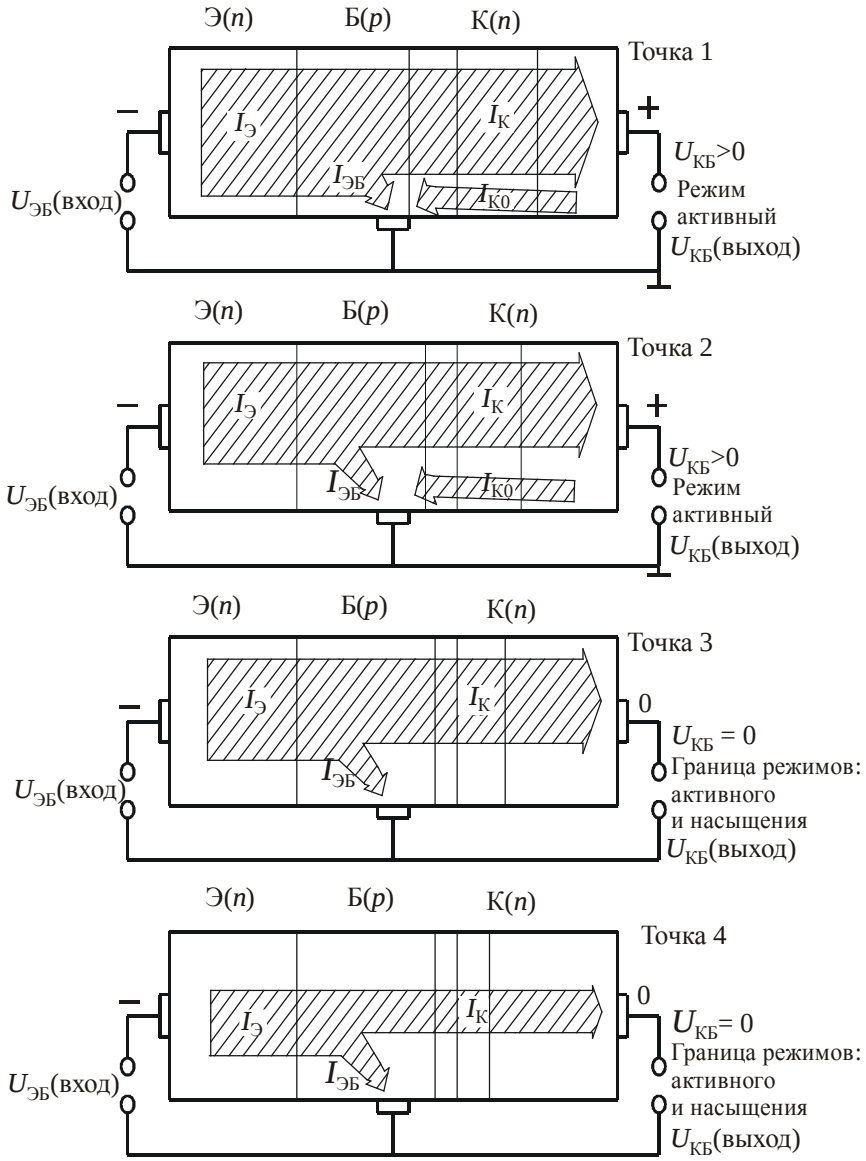
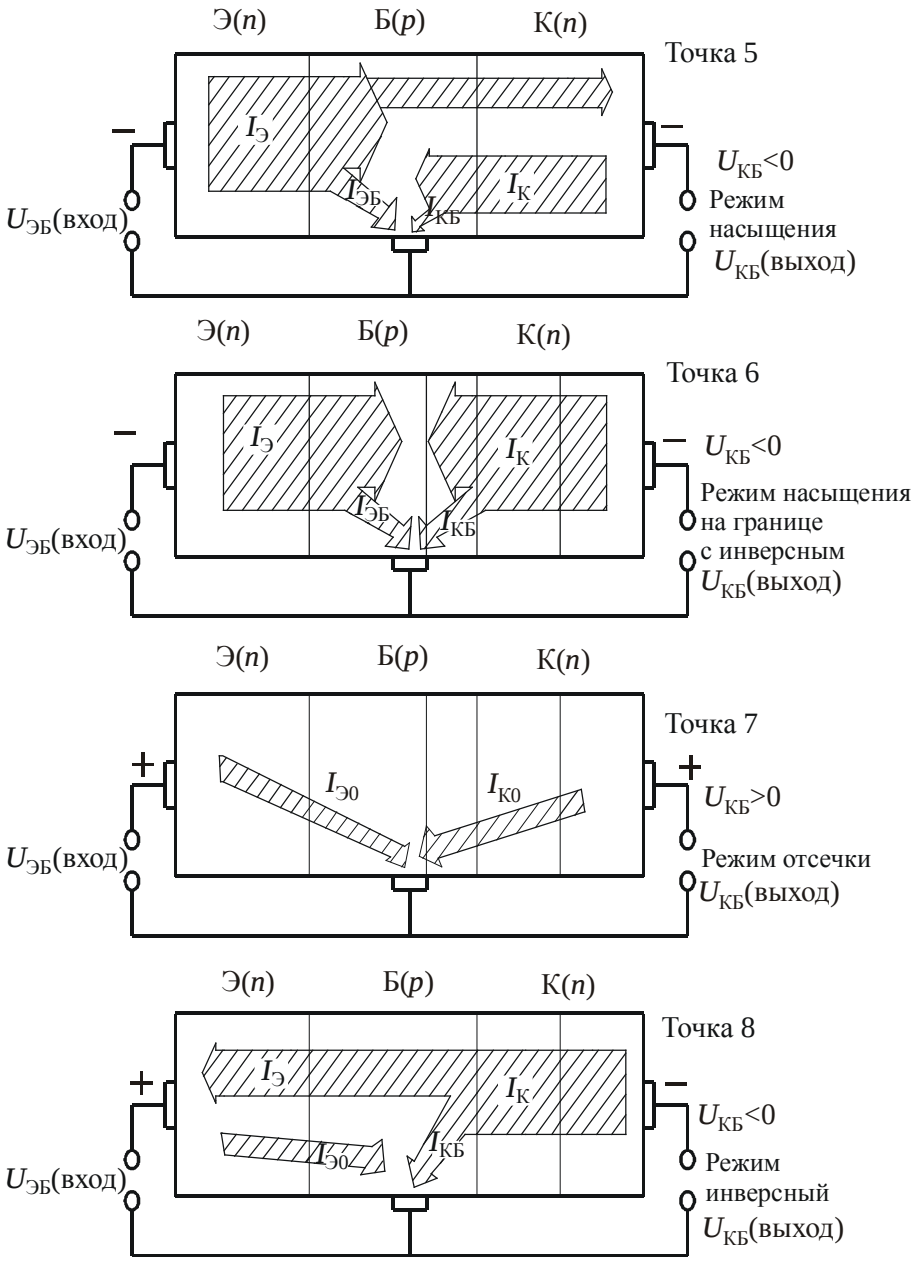


Рис.6. Модели, поясняющие работу транзистора, соответствующие рабочим точкам 1 - 8 на рис.5,*а* на выходных ВАХ в схеме включения с ОБ; *I* - потоки носителей зарядов, пропорциональные соответствующим


Э(n)
Б(p)
К(n)
Точка 5
$I_Э$
$I_{ЭБ}$
$I_{КБ}$
$I_К$
$U_{КБ}$<0
Режим
насыщения
$U_{ЭБ}$(вход)
$U_{КБ}$(выход)
Точка 6
$U_{КБ}$<0
Режим насыщения
на границе
с инверсным
Точка 7
$I_{Э0}$
$I_{К0}$
$U_{КБ}$>0
Режим отсечки
Точка 8
$I_{Э0}$
Режим
инверсный

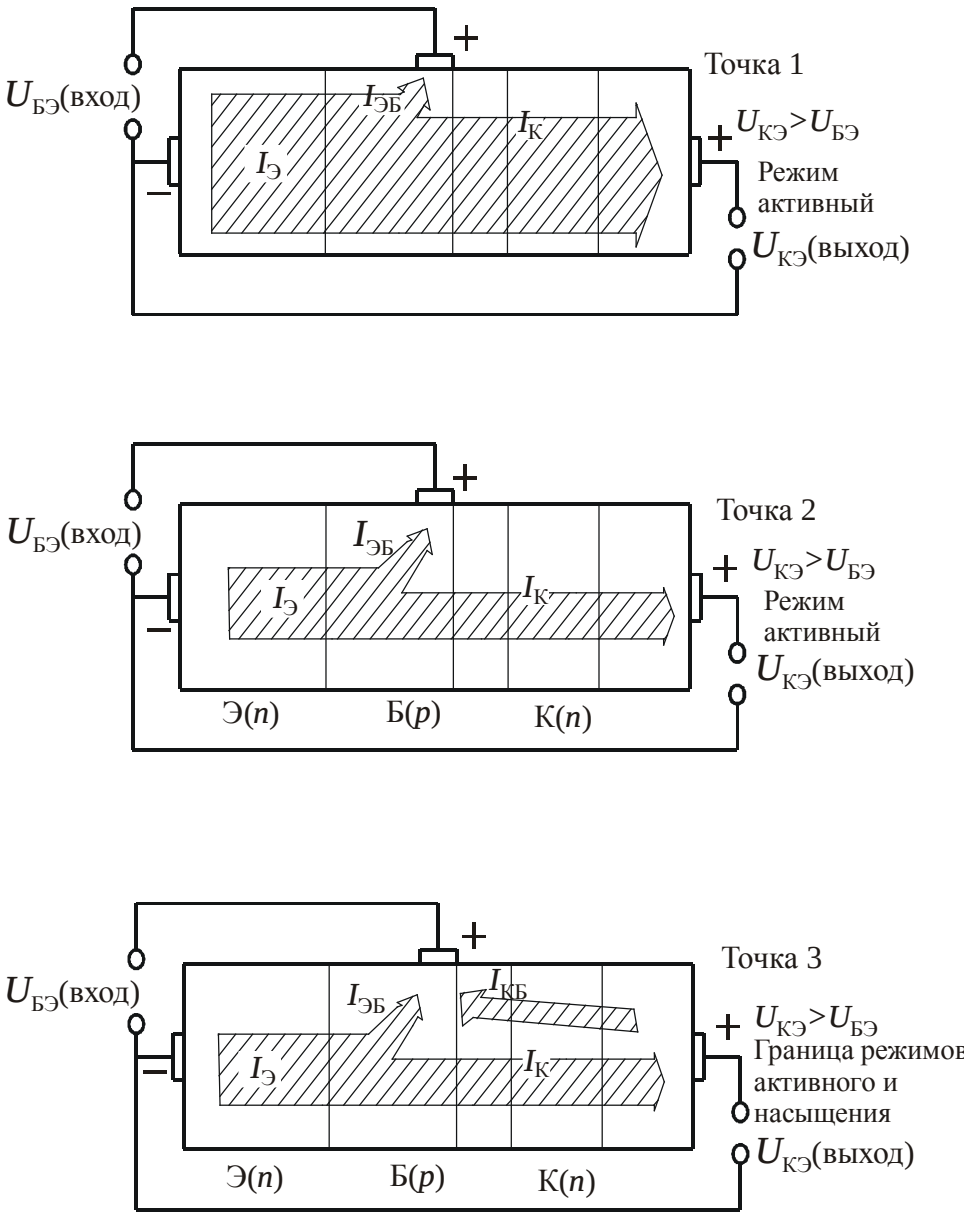
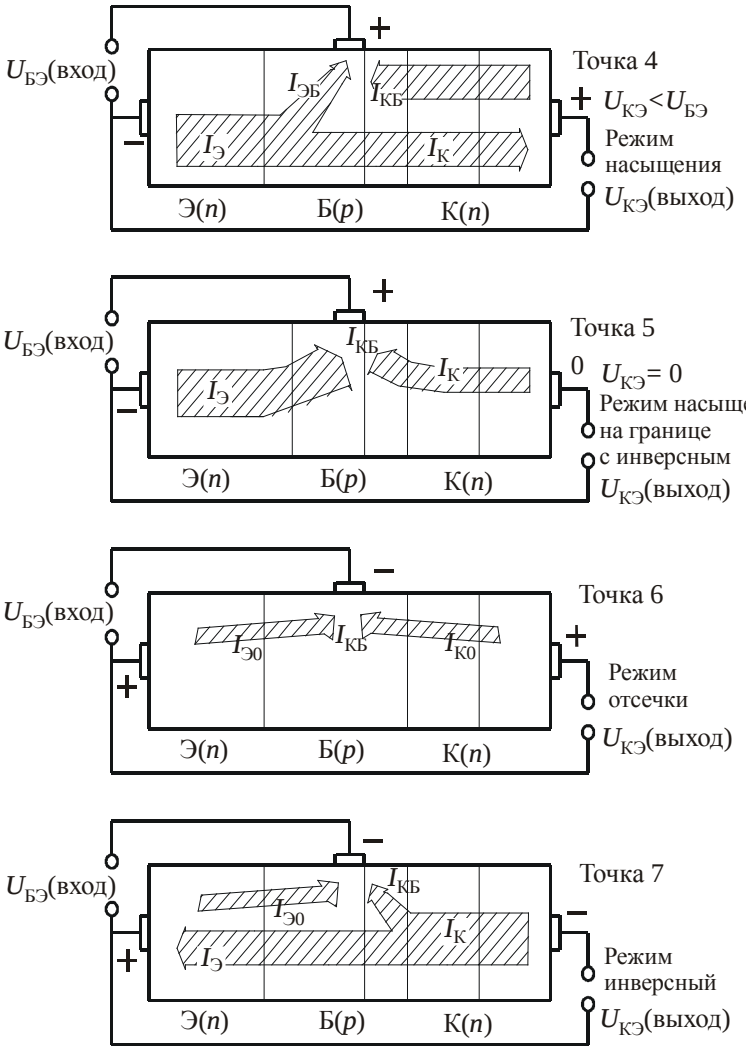


Рис.7. Модели, поясняющие работу транзистора, соответствующие рабочим точкам 1 - 7 на рис.5,*б* на выходной ВАХ в схеме включения с ОЭ; *I* – потоки носителей зарядов, пропорциональные соответствующим токам


$U_{БЭ}$(вход)
$I_{ЭБ}$
$I_{КБ}$
$I_Э$
$I_К$
Э(n)
Б(p)
К(n)
Точка 4
$U_{КЭ}$<$U_{БЭ}$
Режим
насыщения
$U_{КЭ}$(выход)
Точка 5
0
$U_{КЭ}$= 0
Режим насыщения
на границе
с инверсным
Точка 6
$I_{Э0}$
$I_{К0}$
Режим
отсечки
Точка 7
Режим
инверсный

Сравнение входных ВАХ (зависимости $I_{вх}$ от $U_{вх}$) схем с ОБ и ОЭ при заданном напряжении на коллекторе показывает, что увеличение $U_К$ (при фиксированном токе на входе) приводит к увеличению $I_{вх}$ для схемы с ОЭ и уменьшению его для схемы с ОБ. Объяснение этому наиболее просто можно найти, проанализировав модели на рис.6 и 7. Так, в схеме с ОБ (см. рис.4,*а*; рис.5,*а*; рис.6) по мере уменьшения положительного потенциала на коллекторе (уменьшения тянущего поля коллектора) результирующий поток носителей заряда в коллекторной области уменьшается (см. рис.6, точки 1 - 4), а в базовой - увеличивается. Если $U_{КБ} = 0$, то часть общего потока носителей заряда ответвляется в базовую область, однако только при $U_{КБ} < 0$, т.е. когда оба $p - n$-перехода будут смещены в прямом направлении, поток носителей заряда в базе будет максимальным, т.е. наступит режим насыщения (рис.6, точки 5, 6). Таким образом, кривая $U_{КБ} = 0$ на входной характеристике (рис.4,*а*) будет граничной между активным режимом работы транзистора и режимом насыщения. Объяснение на рис.6 моделей, соответствующих точкам 7 и 8 на рис.5, трудностей не представляет.

В схеме с ОЭ (см.рис.4,*б*; рис.5,*б*; рис.7) величина результирующего потока носителей заряда в коллекторной области определяется тем, насколько положительный потенциал коллектора превышает положительный потенциал базы, т.е. в этом случае будет происходить токораспределение между областями транзистора. Так, если, $U_{КЭ} > U_{БЭ}$, то в базовую область ответвляется небольшая часть носителей заряда из общего потока (см. рис.7, точки 1 и 2), но как только $U_{КЭ}$ становится меньшим $U_{БЭ}$ основная часть потока ответвляется в базу, что аналогично прямому включению обоих $p - n$-переходов, т.е. транзистор перешел в режим насыщения (см. рис.7, точки 3, 4, 5; а также рис.5,*б*). Следовательно, кривая для $U_{КЭ} = U_{БЭ}$ на входной характеристике (см. рис.4,*б*) будет граничной между активным режимом работы транзистора и режимом насыщения. Таким образом, в схеме о ОЭ характеристики смещаются вправо с увеличением напряжения на коллекторе, а в схеме с ОБ - влево (см. рис.4,*а*,*б*).

Степень влияния $U_К$ на входную цепь больше в схеме с ОЭ. Для рис.4 входное сопротивление в рабочей точке А (для постоянного тока):

$$R_{вх} = \frac{U_{ЭБА}}{I_{ЭА}}.$$

Дифференциальное значение входного сопротивления при этом

$$r_{вх} = \frac{\Delta U}{\Delta I}.$$

Выходные характеристики (зависимости $I_{вых}$ от $U_{вых}$) для схем включения с ОБ и ОЭ (см. рис.5,*а*,*б*) в большей степени, чем входные ВАХ, отличаются между собой. В схеме с ОБ ВАХ идут почти горизонтально, расстояния между кривыми в активном режиме меняются пропорционально приращению $I_Э$. Пробивное напряжение почти не зависит от тока, а сами характеристики заходят в область отрицательных напряжений на коллекторе (рис.5,*а*). В то же время при включении с ОЭ ВАХ идут практически из начала координат, имеют явно выраженный наклон по отношению к оси напряжений, который увеличивается с ростом $U_{КЭ}$ (рис.5,*б*). Расстояния между кривыми в активном режиме в этом случае меняются пропорционально приращению $I_Б$. Пробивное напряжение становится меньше, чем в схеме с ОБ. Разница начальных участков выходных ВАХ объясняется тем, что при $U_{КБ} = 0$ (см. рис.6, точки 3 и 4) ток носителей, инжектируемых в базу из эмиттера, почти полностью достигает коллекторного перехода. Для того, чтобы ток коллектора стал равен нулю, необходимо вызвать ток инжекции носителей из коллектора в базу, равный по величине и обратный по направлению току инжекции из эмиттера. Поэтому $I_К$ обращается в нуль только после того, как изменится знак $U_{КБ}$, т.е. коллекторный переход будет смещен в прямом направлении (см. рис.6, точка 6). Различие в дальнейшем ходе выходных ВАХ (т.е. при $U_{КБ} > 0$) (см. рис.7,

точки 1, 2, 6) можно понять, если сравнить упрощенные выражения, описывающие семейство выходных ВАХ для схемы с ОБ:

$$I_К = \alpha I_Э + I_{К0} + U_{КБ} / r_{вых\ Б} \qquad (8)$$

и для схем с ОЭ:

$$I_К = \beta I_Б + I_{К0}\beta + (U_{КЭ} / r_{вых\ Э})(1 + \beta). \qquad (9)$$

Таким образом, на ход ВАХ в схеме с ОБ влияет коэффициент передачи тока α, а для схемы с ОЭ - β, поэтому с учетом (7) можно отметить, что для схем с ОЭ ВАХ имеют более резко выраженную зависимость между токами и напряжениями в транзисторе, что и определяет разницу видов этих семейств. Так, при отсутствии $I_{вх}$ (см. рис.6, точка 7) в схеме с ОБ протекает только $I_{КО}$, а в схеме о ОЭ - в β раз больший ток (см. рис.7, точка 6). При достижении некоторого значения $U_К$ наблюдается резкое увеличение $I_К$. Напряжение, соответствующее резкому увеличению $I_К$, называют напряжением пробоя $U_{проб}$ (см. рис.5,*а*,*б*, область V).

Схема включения с ОК имеет много общего со схемой ОЭ, потому что в обеих схемах управляющим (входным) током является ток базы, а выходные токи $I_Э$ (схема с ОК) или $I_К$ (схема с ОЭ), как известно, различаются незначительно. Поэтому семейства выходных статических ВАХ у схем с ОК и ОЭ отличаются незначительно. Входные ВАХ у схем с ОК будут сдвинуты вправо на величину напряжения коллекторного перехода, которое в этом случае играет роль входного напряжения.

Использование статических вольт-амперных характеристик для определения основных параметров транзистора

По входным характеристикам можно определить следующие параметры транзистора:

- дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода транзистора при включении с ОБ:

$$r_{Э_{ОБ}} = \left.\frac{\Delta U_{ЭБ}}{\Delta I_Э}\right|_{U_{КБ=const}}; \qquad (10)$$

- то же при включении с ОЭ:

$$r_{Б_{ОЭ}} = \left.\frac{\Delta U_{ЭБ}}{\Delta I_Б}\right|_{U_{КЭ=const}}. \qquad (11)$$

По выходным характеристикам определяются следующие параметры транзистора:

1) коэффициент передачи тока в схемах с ОБ и ОЭ:

$$\alpha = \left.\frac{\Delta I_К}{\Delta I_Э}\right|_{U_{КБ}=const};$$

$$\beta = \left.\frac{\Delta I_К}{\Delta I_Б}\right|_{U_{КЭ}=const};$$

2) дифференциальное сопротивление коллекторного перехода

$$r_{К_{ОБ}} = \left.\frac{\Delta U_{КБ}}{\Delta I_К}\right|_{I_Э=const};$$

$$r_{К_{ОЭ}} = \left.\frac{\Delta U_{КЭ}}{\Delta I_К}\right|_{I_Б=const};$$

3) напряжение насыщения в схемах с ОБ и ОЭ: $U_{КБН_{ОБ}}, U_{КЭН_{ОЭ}}$;

4) выходные сопротивления транзистора в режиме насыщения:

$$r_{\text{вых}_{\text{ОБ}}} = \frac{\Delta U_{\text{КБ}}}{\Delta J_{\text{КН}}},$$

$$r_{\text{вых}_{\text{ОЭ}}} = \frac{\Delta U_{\text{КЭ}}}{\Delta J_{\text{КН}}};$$

5) крутизна выходной ВАХ для схемы с ОЭ:

$$S = \frac{\Delta J_{\text{К}}}{\Delta U_{\text{КЭ}}}.$$

Конструктивные особенности планарно-эпитаксиальных транзисторов

Использование биполярных транзисторов с различными конфигурациями и геометрическими размерами отдельных областей (эмиттера, базы, коллектора) определяется наличием взаимосвязи их электрических характеристик с конструктивными. Так, периметр эмиттера определяет токовые характеристики транзистора, площадь эмиттера оказывает влияние на частотные характеристики, площадь базы определяет емкость перехода база - коллектор и распределенное сопротивление базы, площадь коллектора определяет емкость перехода коллектор - подложка и последовательное сопротивление коллектора и т.д.

В логических схемах, которые, как правило, являются маломощными, размеры эмиттерной, базовой и коллекторной областей стараются сделать как можно меньшими. Для микромощных схем наиболее пригодной оказывается однополосковая конструкция транзистора, показанная на рис.8,*а*, поскольку размеры транзистора в этом случае минимальны.

Если необходимо получить малое сопротивление тела коллектора, выровнять его потенциал, применяют транзисторы с увеличенной контактной областью коллектора, в частности, с П-образным контактом (см. рис.8,*б*).

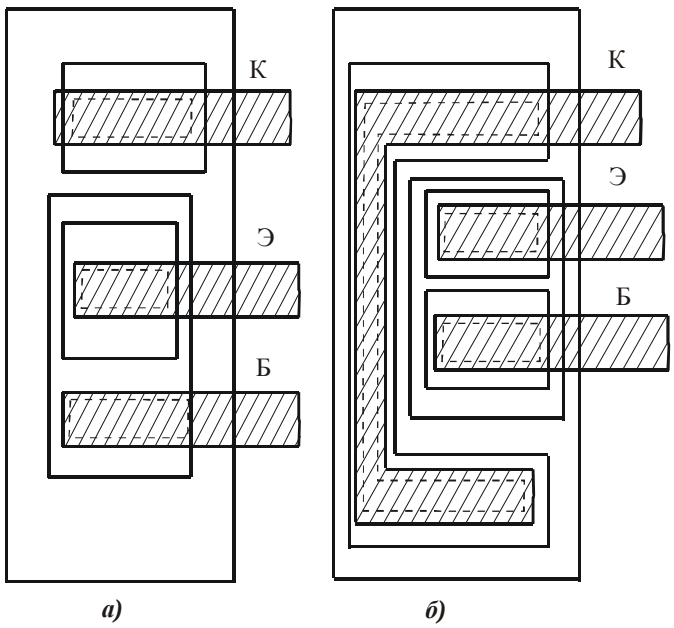
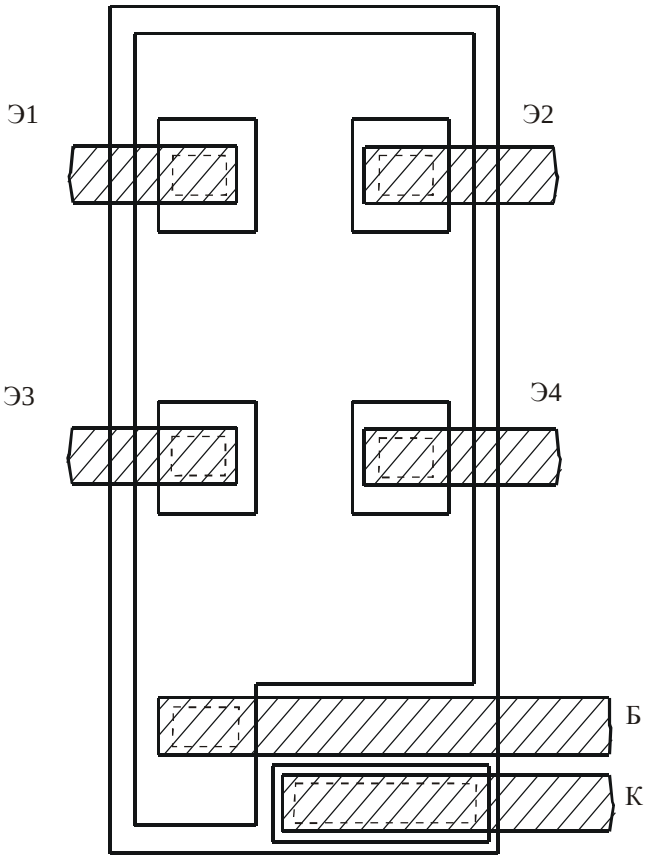
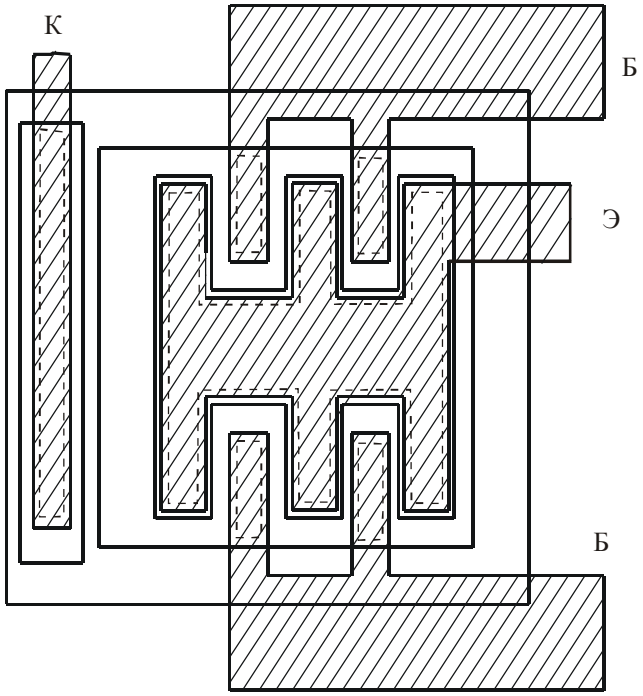


Рис.8. Типовые конфигурации транзисторов: *а* - однополосковый; *б* - однополосковый с П-образным контактом к коллектору; *в* - многоэмиттерный

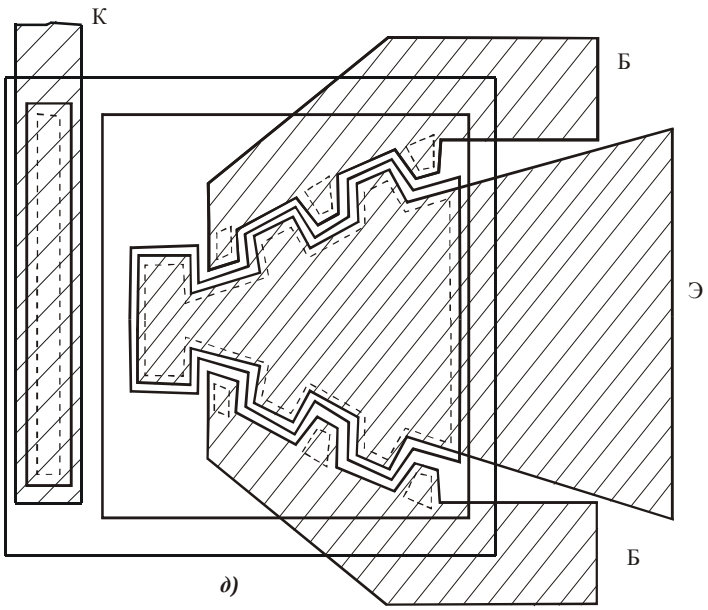


в)

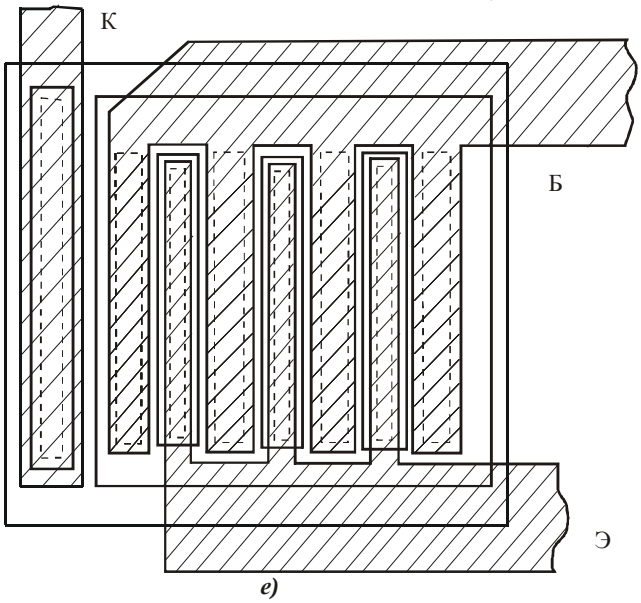


г)

Рис.8. Типовые конфигурации транзисторов: *г* - древовидный с симметричным расположением ветвей; *д* - елочный; *е* - гребенчатый



д)



е)

Типовая структура многоэмиттерного транзистора показана на рис.8,*в*. Он нашел широкое применение в логических микросхемах, в частности, во входных цепях схем транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ). Активные базовые области, находящиеся под эмиттерными $p - n$-переходами, объединены между собой с помощью пассивной области базы. Для такого транзистора специфической особенностью является наличие паразитных транзисторов эмиттер - база - эмиттер, действие которых существенно в случаях, когда расстояния между эмиттерами соизмеримы с диффузионной длиной L_n электронов. Использование многоэмиттерных транзисторов существенно расширяет функциональные возможности микросхем.

Транзисторы средней и большой мощности работают в режимах, для которых характерны высокие плотности эмиттерного тока. При высоком уровне инжекции возрастает базовый ток, что вызывает необходимость учитывать падение напряжения вдоль базы. Напряжение на эмиттерном $p - n$-переходе $U_{\text{ЭБ}}$ равняется разности внешнего напряжения и падения напряжения в объеме базы. Следовательно, напряжение в центральной части эмиттера меньше напряжения у краев эмиттера и распределение тока по площади эмиттера неоднородно. Происходит оттеснение тока к периферийной части эмиттера. Это означает, что внешняя часть эмиттера работает при повышенных плотностях тока, а его центральная внутренняя часть - при пониженных. Повышенная плотность тока у краев эмиттера приводит к увеличению потерь на поверхностную рекомбинацию и к уменьшению коэффициента передачи тока. Поэтому в мощных транзисторах более целесообразно использовать узкие эмиттеры с большим периметром.

Топология мощного транзистора разрабатывается так, чтобы обеспечивалось максимальное отношение периметра к его площади, для чего делают периметр эмиттера фигурным: гребенчатым, древовидным, Т-образным, елочным и т.д. Тем самым удается значительно увеличить активную область транзисторной структуры и обеспечить большой рабочий ток без увеличения общих размеров всей структуры транзистора. Для выравнивания потенциала базы, уменьшения ее омического сопротивления, улучшения теплоотвода у мощных транзисторов, как правило, увеличивают количество контактов к базовой области. На рис.8,*г*,*д* показаны конфигурации транзисторов повышенной мощности: древовидного с симметричным расположением ветвей (*г*), елочного (*д*), гребенчатого (*в*).

Лабораторное задание

1. Ознакомиться с описанием настоящей работы и правилами работы с микроскопом (см. Инструкцию по правилам обращения с микроскопом ММУ-3).

2. Получить на экране осциллографа и зарисовать на кальку или на миллиметровую бумагу следующие статические ВАХ транзистора:

а) семейство выходных характеристик транзистора, включенного по схеме с ОЭ, при трех различных значениях тока базы и напряжении на коллекторе, изменяющемся до 2 В (начальные участки ВАХ);

б) выходную характеристику при одном из значений тока базы, использованных при выполнении предыдущего пункта, при напряжении на коллекторе, изменяющемся в пределах до $U_{\text{К max}}$ (характеристику с пробойной областью).

3. Пользуясь зарисованными графиками ВАХ, вычислить следующие статические параметры транзистора:

а) коэффициент усиления базового тока β;

б) коэффициент усиления эмиттерного тока α;

в) напряжение пробоя $U_{\text{К проб}}$;

г) значения крутизны S_1, S_2, S_3, для каждой из трех кривых семейства ВАХ, выбрав рабочую точку для определения крутизны при одном из значений $U_К$, находящемся в пределах восходящего участка ВАХ.

4. Рассмотреть под микроскопом образцы из кассеты и заполнить форму таблицы, приведенную в Приложении. При заполнении формы таблицы Приложения необходимо вносить данные (в виде отдельной строки) по каждому типу конструкции (конфигурации) транзисторов, имеющихся в рассматриваемом образце.

5. Рассмотреть под микроскопом образцы из кассеты, найти на одном из них транзистор имеющий конструкцию согласно заданному варианту (см. табл.2), и нарисовать эскиз этого транзистора.

Методика выполнения работы

Методические указания

Перед тем, как приступить к выполнению лабораторной работы, необходимо:

1) ознакомиться с описанием настоящей лабораторной работы;

2) подготовить таблицу с незаполненными графами, так называемую "форму" (см. Приложение в конце описания), и кальку или миллиметровую бумагу для зарисовывания ВАХ с экрана осциллографа;

3) ответить на контрольные вопросы.

Внимание!

Ручки осциллографа разрешается вращать и переключать только во время выполнения работы и только строго в соответствии с описанием. Следить, чтобы при выполнении работы осциллограф был заземлен.

Порядок выполнения работы

1. С помощью набора кабелей соединить лабораторный макет, предварительно вставив в гнездо "образцы" на панели макета плату с микросхемами, с осциллографом С1-65А следующим образом:

а) гнездо "У" макета с гнездом на блоке "Усилитель У" ⟶ осциллографа;

б) гнездо "Х ⟶" на блоке осциллографа с гнездами "Х" и "⊥ (земля)" на макете;

в) гнездо " ⟶" на блоке калибратора с гнездом "К" макета.

2. Установить ручки осциллографа в следующие положения:

- ☼ - в крайнее левое положение;
- ⊙ - в среднее положение;
- 🔔 - в крайнее правое положение;

а) на блоке "Усилитель У":

- ручку способа подачи входного сигнала - в положение "≈";
- "V/дел" - в положение 0,05, ручка "плавно" - в крайнее правое положение;
- " ↕ " - в среднее положение;

б) на блоке развертки:

- ручка "Вид развертки" - в положение -"⟶ Х";
- "Время/дел" - в крайнее левое положение;
- ручки "▰" и "▰" - в средние положения;

в) на блоке синхронизации:

- переключатель "Вид синхронизации" - в положении 1:1;
- переключатель "Вид сигналов" - в положение "≈";

г) на блоке "Калибр":

- переключатель "Виды сигналов" - в положение "–";
- переключатель "Амплитуда напряжения" - в положение "10".

3. Установить ручки на лабораторном макете в следующие положения:

а) переключатель "Род работы" - в положение " ";

б) переключатель "Масштаб" - в положение "×1";

в) ручку "Регулировка напряжения" вывести в крайнее левое положение;

г) переключатель "Полярность напряжения" - в положение "+".

4. Подключить лабораторный макет и осциллограф с помощью сетевых кабелей к розеткам с напряжением ~220 В на стенде, предварительно проверив наличие заземления осциллографа; клемма "⏚" осциллографа должна быть соединена с такой же клеммой на стенде.

5. Включить тумблер "Сеть" на панели осциллографа. После 15-минутного прогрева прибора ручку регулировки яркости "☼" вывести в среднее положение.

6. С помощью ручек перемещения луча по вертикали и горизонтали " ↕ ". "▰" вывести луч сначала в центр экрана, а затем - в левый нижний угол экрана осциллографа.

7. Вращая ручку "Регулировка напряжения", получить на экране выходную ВАХ транзистора, включенного по схеме с ОЭ.

8. Для получения семейства ВАХ выбрать три положения ручки "Амплитуда напряжения" на блоке калибратора, переводя ее в положения "1", "2", "5", "10", "20" таким образом, чтобы все три ВАХ транзистора, соответствующие различным токам базы, помещались на экране осциллографа. Если это не удается получить, то изменить положение переключателя "V/дел" на блоке "Усилитель У", перевести его в положение 0,02 (или 0,1, или 0,01) и затем подобрать такое положение ручки "Амплитуда напряжения" на блоке калибратора, чтобы три ВАХ помещались на экране осциллографа.

9. Записать положение ручки " V/дел" и ручки "Амплитуда напряжения" калибратора для каждой из трех кривых и зарисовать все три ВАХ на кальке или миллиметровой бумаге на одном графике.

10. Получить ВАХ транзистора с пробойной областью, для этого:

а) переключатель "Масштаб" на панели лабораторного макета перевести в положение "×40";

б) на панели осциллографа переключатель "Амплитуда напряжения" калибратора поставить в одно из положений: "1", "2" или "5", а переключатель " V/дел" на блоке "Усилитель У" - в положение "0,01";

в) вывести ручку "Регулировка напряжения" на панели макета вправо до получения ВАХ транзистора с пробойной областью";

г) зарисовать полученную кривую на кальке или миллиметровой бумаге.

11. Вывести ручку "Регулировка напряжения" на макете в крайнее левое положение.

12. Выключить тумблер "Сеть" на панели осциллографа.

13. Отключить лабораторный макет и осциллограф от сети 220 В. Вынуть из гнезда "образцы" на панели макета плату с микросхемами. Отключить соединительные провода, соединяющие макет и осциллограф.

14. Рассчитать масштабы полученных графиков - численные значения тока I_0 и напряжения U_0 на одно деление на экране осциллографа (на зарисованных на кальке или миллиметровой бумаге ВАХ). Отметить масштабы по осям токов (ось *Y*) и напряжений (ось *X*).

Масштаб тока на 1 большое деление на экране осциллографа определяется в амперах по формуле I_0 = У/100 [А], где У - положение ручки регулировки "V/дел" блока "Усилитель У" на панели осциллографа.

Масштаб напряжения на 1 большое деление на экране осциллографа определяется в вольтах по формуле

$$U_0 = M \cdot C \cdot 0{,}125 \text{ [В]},$$

где M = 1 при установке тумблера "Масштаб" на панели макета в положение "×1" и M = 40 при установке того же тумблера в положение "×40"; коэффициент С определяется положением переключателя "Вид синхронизации" на блоке синхронизации передней панели осциллографа. При положении этого переключателя "1:1". C = 1, при положении "1:10" C = 10.

Значение тока базы $I_Б$, при котором получена ВАХ транзистора, определяется численно положением ручки "Амплитуда напряжения" блока калибратора на панели осциллографа: $I_Б = |V|$ [мкА].

15. Включить микроскоп и рассмотреть образцы в кассете. Заполнить форму таблицы (см. п. 4 лабораторного задания).

16. Нарисовать эскиз транзистора согласно заданному варианту.

17. Сделать расчеты согласно п. 3 лабораторного задания.

18. Оформить отчет по проделанной работе.

Требования к отчету

Отчет должен содержать:

1) титульный лист;
2) цель работы, краткий конспект теоретических сведений;
3) графики полученных зависимостей (ВАХ) с разметкой масштабов по осям, аккуратно вычерченные на миллиметровой бумаге или кальке;
4) результаты расчета по полученным ВАХ статических параметров транзистора;
5) заполненную форму таблицы (см. Приложение);
6) эскиз транзистора (вид сверху) и его сечение согласно варианту задания (табл.2);
7) выводы по проделанной работе.

Таблица 2

Варианты заданий

Номер бригады	Эскиз конструкции транзистора
1	С круглым эмиттером
2	Многоэмиттерный
3	Древовидный
4	Елочный
5	Однополосковый
6	Гребенчатый
7	Многоэмиттерный
8	Древовидный
9	Елочный
10	Однополосковый с П-образным контактом к коллектору

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой конструкция транзистора?
2. Какие режимы работы биполярного транзистора Вы знаете?
3. Назовите известные Вам схемы включения транзистора.
4. В чем заключаются основные отличия входных и выходных ВАХ в схемах включения с ОБ и ОЭ?
5. Как определить по ВАХ напряжение насыщения в схемах включения транзистора с ОБ и ОЭ?
6. Какие статические параметры транзистора можно рассчитать по входным ВАХ?
7. Какие статические параметры транзистора можно рассчитать по выходным ВАХ?
8. Охарактеризуйте конструкцию планарно-эпитаксиального транзистора.
9. В чем отличия энергетических диаграмм $p-n-p$- и $n-p-n$-транзисторов?
10. Зарисовать структуру транзистора, найдя ее под микроскопом на одном из образцов, и сделать сечение транзистора:

а) многоэмиттерного;
б) гребенчатого;
в) древовидного;
г) елочного.

11. В каких случаях применяются многоэмиттерные транзисторы? В чем заключается их основной недостаток?
12. В чем заключается эффект оттеснения эмиттерного тока, каким образом его подавляют при конструировании мощных транзисторов?
13. Каковы особенности конструкций мощных транзисторов?
14. Поясните, почему транзистор способен усиливать мощность входного сигнала.

Рекомендуемая литература

1. ***Воженин И.Н., Заводян А.В., Симонов Б.М.*** Основы полупроводниковой микроэлектроники. - М.: МИЭТ, 1983. - 136 с.

2. ***Митрофанов О.В., Симонов Б.М., Коледов Л.А.*** Физические основы функционирования изделий микроэлектроники. - М.: Высшая школа, 1987. - 168 с.

3. ***Гаман В.И.*** Физика полупроводниковых приборов. - Томск: НТЛ, 2000. - 426 с.

4. ***Романов В.П.*** Физические процессы в полупроводниках, *p* – *n*-переходе, биполярном и полевом транзисторах. - М.: МИЭТ, 2001. - 64 с.

5. ***Лачин В.И., Савёлов Н.С.*** Электроника. - Ростов на Дону: Феникс, 2002. - 572 с.

6. ***Кучумов А.И.*** Электроника и схемотехника. - М.: Гелиос АРВ, 2002. - 303 с.