

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный  
технический университет»

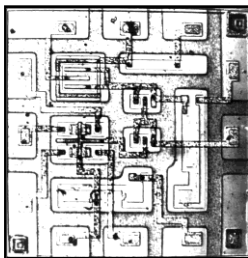
Кафедра полупроводниковой электроники и нанoeлектроники

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к выполнению лабораторных работ № 3 - 5 по дисциплине

**«Физические основы электроники»**

для студентов направления подготовки бакалавров  
210100 «Электроника и нанoeлектроника», профиля  
«Микроэлектроника и твердотельная электроника»  
заочной формы обучения



Воронеж 2013

Составитель канд. техн. наук Т.В. Свистова

УДК 621.382.2

Методические указания к выполнению лабораторных работ № 3 - 5 по дисциплине «Физические основы электроники» для студентов направления подготовки бакалавров 210100 «Электроника и наноэлектроника», профиля «Микроэлектроника и твердотельная электроника» заочной формы обучения / ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет»; сост. Т.В. Свистова. Воронеж, 2013. 45 с.

Методические указания содержат лабораторные работы, позволяющие ознакомиться с физическими принципами действия и рабочими характеристиками полупроводниковых приборов и структур (биполярных и полевых транзисторов, МДП-структур).

Методические указания предназначены для студентов третьего курса

Издание подготовлено в электронном виде в текстовом редакторе MS WORD XP и содержится в файле «Му\_лр\_2\_ФОЭ.doc».

Ил. 22. Библиогр.: 9 назв.

Рецензент канд. физ.-мат. наук, доц. Е.В. Бордаков

Ответственный за выпуск зав. кафедрой  
д-р физ.-мат. наук, проф. С.И. Рембеза

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

© ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2013

## ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум по дисциплине «Физические основы электроники» предназначен для освоения студентами методик измерения параметров и исследования характеристик электронных приборов, используемых для расчета их режимов работы и выявления влияния внешних воздействий на работу приборов.

*Электроника* – область науки и техники, которая занимается изучением электронных и ионных явлений в различных средах и на их границах. Основное место в электронике занимают электронные приборы. В электронных приборах используются вещества во всех четырех агрегатных состояниях – твердые тела, жидкости, газы и плазма. Применяются различные типы электромагнитных взаимодействий, постоянные и переменные электрические и магнитные поля различных конфигураций, в которых движутся потоки заряженных частиц.

Основными направлениями развития электроники являются: вакуумная, твердотельная и квантовая электроника.

*Вакуумная электроника* – это раздел электроники, включающий исследования взаимодействия потоков свободных электронов с электрическими и магнитными полями в вакууме, а также методы создания электронных приборов и устройств, в которых это взаимодействие используется. К важнейшим направлениям исследования в области вакуумной электроники относятся: электронная эмиссия (в частности, термо- и фотоэлектронная эмиссия); формирование потока электронов и / или ионов и управление этими потоками; формирование электромагнитных полей с помощью устройств ввода и вывода энергии; физика и техника высокого вакуума и др. Основные направления развития вакуумной электроники связаны с созданием электровакуумных приборов следующих видов: электронных ламп (диодов, триодов, тетродов и т.д.);

электровакуумных приборов сверхвысокой частоты (например, магнетронов, клистронов, ламп бегущей и обратной волны); электронно-лучевых и фотоэлектронных приборов (например, кинескопов, видиконов, электронно-оптических преобразователей, фотоэлектронных умножителей); газоразрядных приборов (например, тиратронов, газозарядных индикаторов).

**Твердотельная электроника** решает задачи, связанные с изучением свойств твердотельных материалов (полупроводниковых, диэлектрических, магнитных и др.), влиянием на эти свойства примесей и особенностей структуры материала; изучением свойств поверхностей и границ раздела между слоями различных материалов; созданием в кристалле разными методами областей с различными типами проводимости; созданием гетеропереходов и монокристаллических структур; созданием функциональных устройств микронных и субмикронных размеров, а также способов измерения их параметров. Основными направлениями твердотельной электроники являются: **полупроводниковая электроника**, связанная с разработкой различных видов полупроводниковых приборов, и **микрo-электроника**, связанная с разработкой интегральных схем.

**Квантовая электроника** охватывает широкий круг вопросов, связанных с разработкой методов и средств усиления и генерации электромагнитных колебаний на основе эффекта вынужденного излучения атомов и молекул. Основные направления квантовой электроники: создание оптических квантовых генераторов (лазеров), квантовых усилителей, молекулярных генераторов и др. Особенности приборов квантовой электроники следующие: высокая стабильность частоты колебаний, низкий уровень собственных шумов, большая мощность в импульсе излучения - они позволяют использовать их для создания высокоточных дальномеров, квантовых стандартов частоты, квантовых гироскопов, систем оптической многоканальной связи, дальней космической связи, ме-

дицинской аппаратуры, лазерной звукозаписи и воспроизведения и др.

## **ОРГАНИЗАЦИЯ И ПРОВЕДЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

Объем каждой лабораторной работы можно выполнить в отведенное время только при условии предварительной подготовки, в процессе которой студенты должны:

а) изучить теоретический материал по лабораторной работе, пользуясь методическими указаниями и литературой, приведенной в них;

б) уяснить цель работы и порядок ее выполнения;

в) выяснить порядок включения и основные правила работы измерительных приборов;

г) изучить методику выполнения измерений и проведения вычислений.

Лабораторные работы выполняют с соблюдением следующих требований:

1. На одном рабочем месте допускается к работе не более 2 – 3 студентов. Каждый член бригады должен вести рабочую тетрадь.

2. Перед проведением лабораторной работы преподаватель проверяет степень готовности студентов к выполнению работы.

3. Сборку схемы студенты выполняют самостоятельно; правильность соединений элементов схемы проверяет преподаватель до включения схемы. Студенты не имеют права включать схему без проверки ее преподавателем.

4. Первоначальное включение схемы и измерительных приборов под напряжение производится только в присутствии преподавателя или лаборанта.

5. После проведения измерений сделать оценочные расчеты величин или построить предварительные графики, отражающие ход зависимостей, и показать преподавателю. Измерительную схему при этом не выключать! При необходимости по указанию преподавателя провести измерения заново.

6. После выполнения работы выключить приборы из сети, схему соединений разобрать, навести порядок на рабочем месте, и доложить об этом лаборанту.

При работе в лаборатории студенты должны:

строго соблюдать установленные правила внутреннего распорядка и техники безопасности;

бережно обращаться с оборудованием и измерительными приборами;

соблюдать следующие правила обращения с измерительными приборами:

а) при включении в схему приборов постоянного тока следить за полярностью включения;

б) до включения напряжения коммутирующее устройство и ручки управления прибора установить в нужное положение согласно инструкции;

в) после включения напряжения необходимо выдержать установленную для данного типа прибора норму времени прогрева прибора согласно инструкции;

сообщить преподавателю или лаборанту о неисправностях оборудования или измерительных приборов.

Отчет о проделанной работе составляется каждым студентом самостоятельно. Отчет должен содержать:

наименование, цель работы и используемое оборудование;

методику измерений в данной лабораторной работе;

краткие сведения об объектах измерения;

результаты измерений и расчетов (таблицы, графики, осциллограммы);

краткие выводы и заключения.

Исследование работы электронных приборов неизбежно связано с применением повышенных напряжений. Поражение током при этих напряжениях может привести к тяжелым последствиям. Поэтому при выполнении лабораторных работ

необходимо соблюдать следующие правила техники безопасности:

1. Перед началом работ следует ознакомиться с источниками электропитания, способами их включения, эксплуатации и выключения.

2. При сборке схемы все имеющиеся реостаты, автотрансформаторы и потенциометры устанавливаются в положения, указанные в описании к работе.

3. Сборку схемы необходимо производить соединительными проводами с исправной изоляцией.

4. После окончания сборки схемы преподаватель или лаборант должен ее проверить и разрешить включить источники питания.

5. Запрещается включать в схему измерительные приборы, корпуса которых не заземлены; место расположения клеммы « $\perp$ » указывается в техническом описании к приборам.

6. Запрещается прикасаться руками к зажимам, находящимся под напряжением; наличие напряжения на зажимах приборов следует проверять только измерительным прибором.

7. Все изменения в схеме, а также устранения неисправностей следует производить после отключения схемы.

8. Запрещается оставлять без наблюдения схему и измерительные приборы, подключенные к источнику питающего напряжения.

9. Разбирать схему по завершении работы следует только после отключения источников питания и с разрешения преподавателя.



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

### СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

**Цель работы:** экспериментальное изучение семейств статических вольт-амперных характеристик биполярного транзистора в схемах включения с общей базой и общим эмиттером; экспериментальное ознакомление с основными статическими параметрами биполярных транзисторов.

**Используемое оборудование и материалы:** характеристикограф, биполярные транзисторы.

#### Теоретическая часть

**Транзистором** называется полупроводниковый прибор с двумя электронно-дырочными переходами, предназначенный для усиления и генерирования электрических сигналов. В транзисторе используются оба типа носителей – основные и неосновные, поэтому его называют **биполярным**.

Биполярный транзистор (БТ) состоит из трех областей монокристаллического полупроводника с разным типом проводимости: **эмиттера**, **базы** и **коллектора** (рис. 3.1, а, б).

Переход, который образуется на границе эмиттер – база, называется эмиттерным, а на границе база – коллектор – коллекторным. В зависимости от типа проводимости крайних слоев различают транзисторы *p-n-p* и *n-p-n*.

Область транзистора, расположенная между переходами, называется **базой** (Б). Примыкающие к базе области чаще всего делают неодинаковыми. Одну из них изготавливают так, чтобы из нее наиболее эффективно происходила инжекция в базу, а другую – так, чтобы соответствующий переход наилучшим образом осуществлял экстракцию инжектированных носителей из базы.

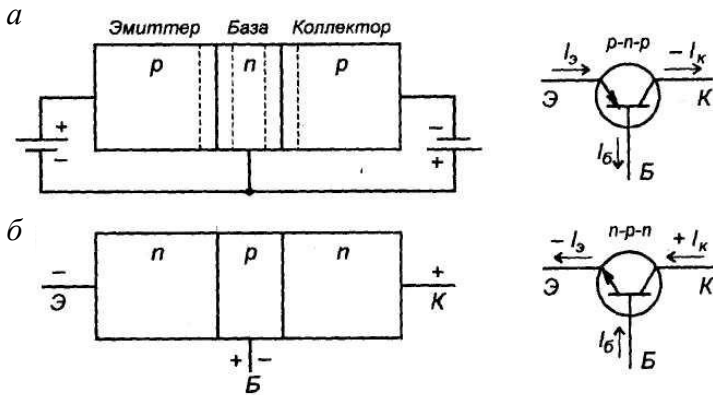


Рис. 3.1. Схематическое изображение биполярного плоскостного транзистора и его условное изображение:  
*а* - *p-n-p*-типа; *б* - *n-p-n*-типа;

Область транзистора, основным назначением которой является инжекция носителей в базу, называют эмиттером (Э), а соответствующий переход – эмиттерным.

Область, основным назначением которой является экстракция носителей из базы, называют коллектором (К), а переход – коллекторным.

Принцип работы транзисторов *p-n-p* и *n-p-n*-типов одинаков, но в транзисторе со структурой типа *p-n-p* основной ток, текущий через базу, создается дырками, инжектируемыми из эмиттера, а в транзисторах со структурой *n-p-n*-типа – электронами. На условных обозначениях эмиттер изображается в виде стрелки, которая указывает прямое направление тока эмиттерного перехода (то есть от «плюса» к «минусу»).

Каждый из переходов транзистора можно включить либо в прямом, либо в обратном направлении. В зависимости от этого различают три режима работы транзистора:

- режим *отсечки* – оба *p-n*-перехода закрыты, при этом через транзистор обычно идет сравнительно небольшой ток;
- режим *насыщения* – оба *p-n*-перехода открыты;
- *активный* режим – один из *p-n*-переходов открыт, а другой закрыт.

В режиме отсечки и режиме насыщения управление транзистором невозможно. В активном режиме такое управление осуществляется наиболее эффективно, причем транзистор может выполнять функции активного элемента электрической схемы. Если на эмиттерном переходе напряжение прямое, а на коллекторном переходе – обратное, то включение транзистора считают *нормальным*, при противоположной полярности – *инверсным*.

Различают три схемы включения транзистора в зависимости от того, какой из электродов транзистора является общим для входного и выходного сигналов (рис. 3.2): с общей базой (ОБ); с общим эмиттером (ОЭ) и с общим коллектором (ОК). В этих схемах источники постоянного напряжения и резисторы нагрузки обеспечивают режимы работы транзисторов по постоянному току.

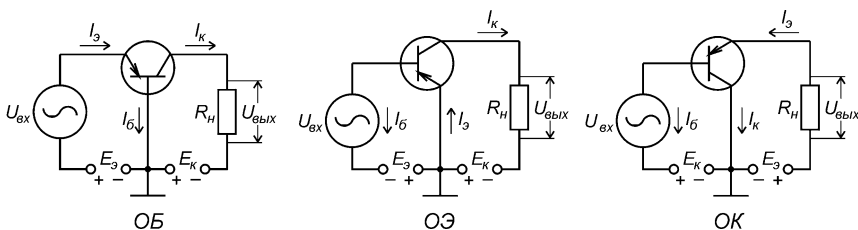


Рис. 3.2. Основные схемы включения транзисторов

Несмотря на то, что в транзисторе имеются три внешних вывода, его можно рассматривать как четырехполюсник. В этом случае транзистор характеризуется четырьмя параметрами: входным напряжением  $U_1$ , током  $I_1$ , выходным напряжением

нием  $U_2$  и током  $I_2$ . Графическое изображение зависимостей между токами и напряжениями называется семейством вольт-амперных характеристик транзистора. Для случая постоянных токов и напряжений это семейство статических характеристик. Для транзистора различают входные и выходные характеристики.

Входные характеристики транзистора  $p-n-p$ -типа в схеме с ОБ определяются зависимостью тока эмиттера от напряжения между эмиттером и базой при постоянном напряжении между коллектором и базой  $I_3 = f(U_{эб})$  при  $U_{кб} = const$  (рис. 3.3, а).

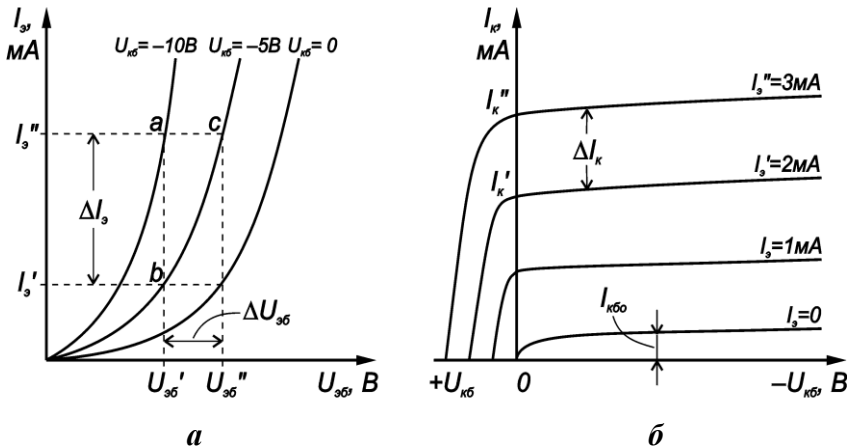


Рис. 3.3. Семейство входных (а) и выходных (б) характеристик  $p-n-p$ -транзистора в схеме с ОБ

При напряжении  $U_{кб} = 0$  вольт-амперная характеристика аналогична характеристике полупроводникового диода при прямом включении. Эмиттерный ток экспоненциально возрастает с увеличением напряжения между эмиттером и базой. Увеличение напряжения коллектор – база (в абсолютном значении) и повышение температуры смещает характеристики в сторону оси ординат (т.е. влево).

Выходные характеристики транзисторов  $p-n-p$ -типа в схеме с ОБ, называемые также коллекторными, определяются зависимостью тока коллектора от напряжения между коллектором и базой при постоянном токе эмиттера  $I_k = f(U_{кб})$  при  $I_э = const$  (рис. 3.3, б). При токе  $I_э = 0$  через коллекторный переход течет обратный ток  $I_{кб0}$ , величина которого слабо зависит от коллекторного напряжения.

С ростом эмиттерного тока растет коллекторный ток, что соответствует принципу действия транзистора. Общий характер этих зависимостей аналогичен обратной ветви вольт-амперной характеристики диода, так как коллекторный переход включен в обратном направлении.

На рис. 3.4, а представлены семейства входных характеристик транзистора  $p-n-p$ -типа в схеме с ОЭ  $I_б = f(U_{эб})$  при  $U_{кэ} = const$ . Входным током транзистора при этой схеме включения является ток базы, характеристика которого при напряжении  $U_{кэ} = 0$  идет из начала координат и представляет собой суммарный ток эмиттерного и коллекторного переходов, соединенных параллельно и подключенных к источнику в прямом направлении. При увеличении по абсолютной величине напряжения коллектор–эмиттер входные характеристики сдвигаются вправо, так как с ростом напряжения вероятность рекомбинаций неосновных носителей в области базы уменьшается, что приводит к уменьшению тока базы и росту коллекторного тока. В справочниках обычно приводятся входные характеристики при  $U_{кэ} = 0$  и  $U_{кэ} = -5$  В. Все остальные характеристики, снятые при  $|U_{кэ}| > 1$  В, незначительно отличаются от характеристики, снятой при  $U_{кэ} = -5$  В.

Коллекторные, т.е. выходные, характеристики транзистора в схеме с ОЭ  $I_k = f(U_{кэ})$  при  $I_б = const$  приведены на рис. 3.4, б. Выходные характеристики в схеме с ОЭ имеют больший наклон, чем в схеме с ОБ, то есть наблюдается большая зависимость тока коллектора от напряжения на коллекторе. С ростом базового тока коллекторные характеристи-

ки располагаются выше, так как увеличение базового тока происходит вследствие увеличения тока эмиттера, следовательно, и тока базы. Выходные характеристики транзистора при выборе в качестве параметра тока  $I_{\delta}$  можно описать с помощью уравнения

$$I_{\kappa} = \beta I_{\delta} + I_{\kappa\varepsilon 0},$$

где  $I_{\kappa\varepsilon 0}$  – начальный («сквозной») ток, который протекает через структуру при токе  $I_{\delta} = 0$ , т.е. при обрыве в цепи базы.

Так как  $I_{\delta} = (1 - \alpha) I_{\varepsilon} - I_{\kappa\delta 0}$ , то при  $I_{\delta} = 0$  имеем  $I_{\varepsilon} = I_{\kappa} = I_{\kappa\delta 0}$ , поэтому получим  $I_{\kappa\varepsilon 0} = I_{\kappa\delta 0} / (1 - \alpha) \approx \beta I_{\kappa\delta 0}$ .

Ток  $I_{\kappa\varepsilon 0}$  в  $\beta$  раз больше тока  $I_{\kappa\delta 0}$ , т.е. тепловой ток в схеме с ОЭ значительно больше, чем в схеме с ОБ, что является недостатком схемы с ОЭ по сравнению со схемой с ОБ.

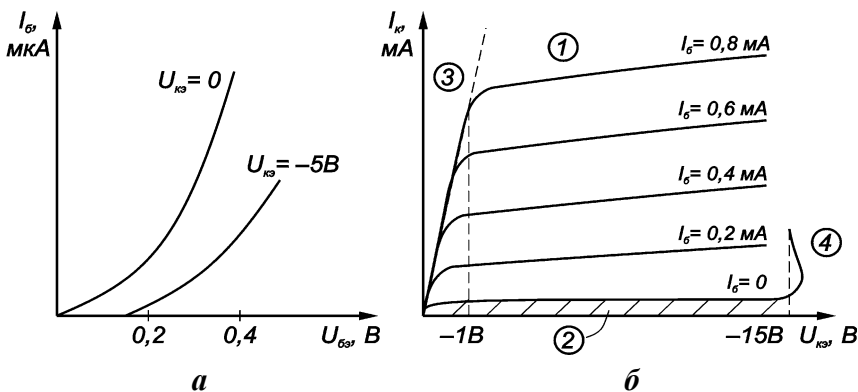


Рис. 3.4. Семейство входных (а) и выходных (б) характеристик  $p-n-p$ -транзистора в схеме с ОЭ

### Экспериментальное задание

Записать типы и марки исследуемых транзисторов. Проанализировать полярности напряжений необходимых для достижения активного прямого режима в схемах включения с

общей базой и с общим эмиттером. Ознакомиться с порядком работы с характеристикографом (см. Приложение).

1. Подключить транзистор к характеристикографу по схеме с общей базой и установить тумблерами полярности напряжений, необходимых для достижения активного прямого режима. Снять семейство статических выходных ВАХ в этой схеме включения (четыре – пять кривых). Выделить области активного режима и режима насыщения.

2. Подключить транзистор к характеристикографу по схеме с общим эмиттером и установить тумблерами полярности напряжений, необходимых для достижения активного прямого режима. Снять семейство статических выходных ВАХ в этой схеме включения в прямом и инверсном режимах (два семейства по четыре – пять кривых). Для прямого и инверсного включения желательно задать хотя бы одно общее значение тока базы.

**Указание:** чтобы перейти от активного режима к инверсному, необходимо поменять местами коллекторный и эмиттерный выводы транзистора на внешних зажимах стенда.

3. Построить передаточные кривые в схеме с общим эмиттером в прямом и инверсном включениях (две кривые в одних координатах при одном и том же значении тока базы).

4. Определить статические коэффициенты передачи  $h_{21 \alpha}$ ,  $h_{21 \beta}$  при одинаковых или близких значениях тока базы и напряжений на выходе.

5. Измерить пробивные напряжения база – эмиттер, база – коллектор, коллектор – эмиттер. Если пробой не удастся наблюдать, то необходимо зафиксировать максимальное напряжение, поданное на транзистор. Для наблюдения пробоя рекомендуется изменить масштаб по оси напряжений так, чтобы наблюдать на экране как можно большее напряжение.

## Контрольные вопросы

1. Что такое транзистор? Какие бывают структуры биполярных транзисторов и их обозначение?
2. Приведите основные схемы включения биполярных транзисторов.
3. Перечислите основные режимы включения биполярного транзистора.
4. Укажите полярности напряжений на входе и выходе транзистора, обеспечивающие заданный режим для  $p-n-p$ - и  $n-p-n$ -транзисторов в схемах включения с общей базой и общим эмиттером.
5. Что называется коэффициентом передачи тока эмиттера и статическим коэффициентом передачи тока базы?
6. По какой схеме нужно включить транзистор, чтобы получить усиление по току?
7. Какая схема включения транзистора дает усиление по напряжению?
8. Какая схема включения транзистора дает усиление по мощности?
9. Нарисуйте входные и выходные ВАХ транзистора в схеме включения с общей базой, укажите области активного режима, насыщения, отсечки.
10. Нарисуйте входные и выходные ВАХ в схеме включения с общим эмиттером, укажите области активного режима, насыщения, отсечки.



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ МДП-СТРУКТУРЫ

**Цель работы:** исследование вольт-фарадных характеристик реальной МДП-структуры; исследование импульсных свойств МДП-структуры.

**Используемое оборудование и материалы:** измеритель вольт-фарадных характеристик, вольтметр, импульсный генератор, осциллограф, пластина с МДП-структурами

#### Теоретическая часть

Структуры металл – диэлектрик – полупроводник, или сокращенно МДП-структура представляет собой монокристаллическую пластину полупроводника, называемую *подложкой*, закрытую с планарной стороны *диэлектриком*. Металлический электрод, нанесенный на диэлектрик, носит название *затвора*, а сам диэлектрик называется *подзатворным*. На обратную сторону полупроводниковой пластины наносится металлический электрод, называющийся омическим контактом (рис. 4.1). Довольно часто в качестве диэлектрика в МДП-структурах используют оксиды, поэтому вместо МДП употребляется название МОП-структура.

*Идеальная МДП-структура* - это такая система металл – диэлектрик – полупроводник в которой:

- отсутствуют поверхностные состояния на границе раздела полупроводник – диэлектрик;
- термодинамические работы выхода металла затвора и полупроводника подложки равны между собой;
- отсутствуют заряженные центры в объеме подзатворного диэлектрика;
- сопротивление подзатворного диэлектрика бесконечно велико, так что сквозной ток через него отсутствует при любых напряжениях на затворе.

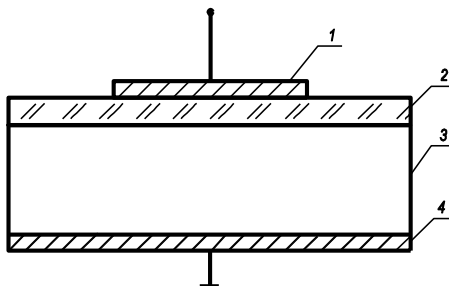


Рис. 4.1. МДП-структура: 1 – затвор; 2 – подзатворный диэлектрик; 3 – полупроводниковая подложка; 4 – омический контакт

Зонные диаграммы идеальных МДП-структур при напряжении на затворе  $V = 0$  приведены на рис. 4.2.

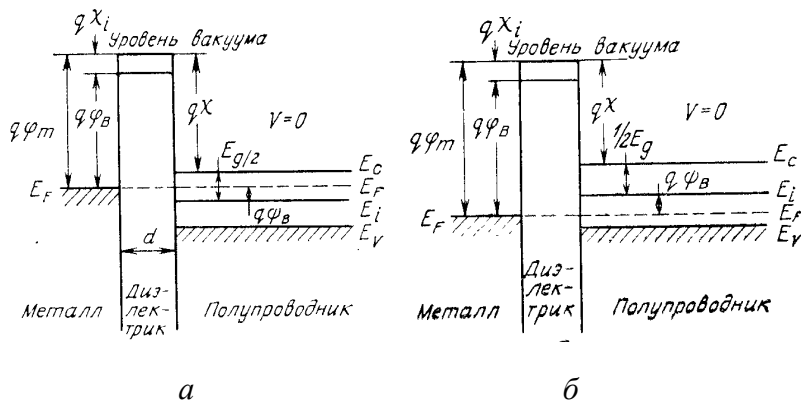


Рис. 4.2. Зонные диаграммы идеальных МДП-структур при напряжении на затворе  $V = 0$  : а – полупроводник  $n$ -типа; б - полупроводник  $p$ -типа

МДП-структуры, близкие к идеальным, получают, используя «хлорную» технологию термического выращивания

диоксида кремния на кремнии, причем для  $n$ -Si в качестве материала затвора используется алюминий, а для  $p$ -Si - золото.

МДП-структуры, в которых нарушается одно из вышеперечисленных требований, получили название реальных МДП-структур.

Когда к идеальной МДП-структуре приложено напряжение того или другого знака, на полупроводниковой поверхности могут возникнуть три основные ситуации (рис. 4.3). Рассмотрим их сначала для МДП-структуры с полупроводником  $p$ -типа. Если к металлическому электроду структуры приложено отрицательное напряжение ( $V < 0$ ), край валентной зоны у границы с диэлектриком изгибается вверх и приближается к уровню Ферми (рис. 4.3, *а*). Поскольку в идеальной МДП-структуре сквозной ток равен нулю, уровень Ферми в полупроводнике остается постоянным. Так как концентрация дырок экспоненциально зависит от разности энергий ( $E_F - E_V$ ), такой изгиб зон приводит к увеличению числа основных носителей (дырок) у поверхности полупроводника. Этот режим называется **режимом обогащения (аккумуляции)**. Если к МДП-структуре приложено не слишком большое положительное напряжение ( $V > 0$ ), зоны изгибаются в обратном направлении и приповерхностная область полупроводника обедняется основными носителями (рис. 4.3, *б*). Этот режим называют **режимом обеднения** или **истощения** поверхности. При больших положительных напряжениях зоны изгибаются вниз настолько сильно, что вблизи поверхности происходит пересечение уровня Ферми  $E_F$  с собственным уровнем  $E_i$ . В этом случае (рис. 4.3, *в*) концентрация неосновных носителей (электронов) у поверхности превосходит концентрацию основных носителей (дырок). Эта ситуация называется **режимом инверсии**. Аналогичное рассмотрение можно провести и для МДП-структуры с полупроводником  $n$ -типа. Указанные режимы осуществляются при напряжении противоположной полярности.

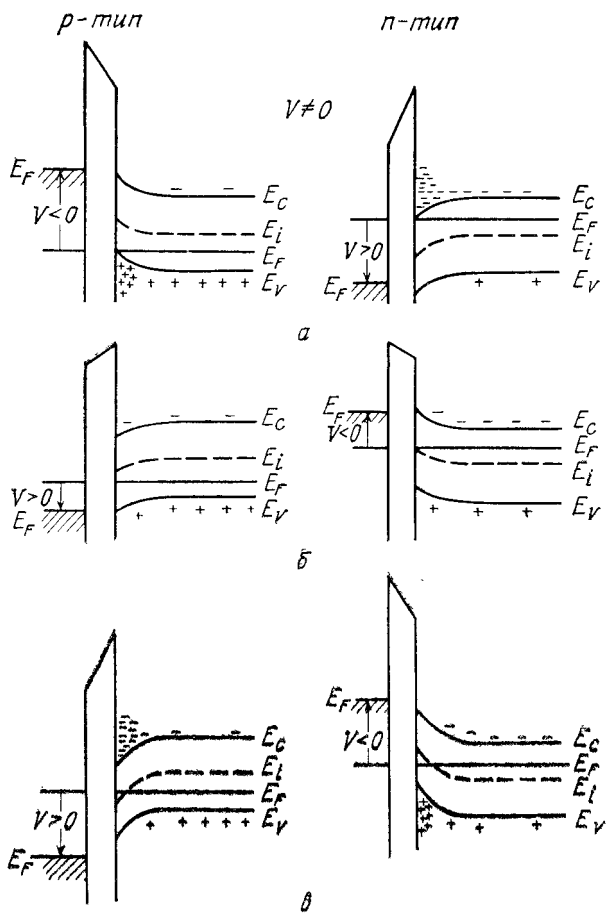


Рис. 4.3. Зонные диаграммы идеальных МДП-структур при напряжении на затворе  $V \neq 0$ : а – режим аккумуляции; б – режим обеднения; в – режим инверсии

Одним из наиболее распространенных методов изучения свойств структур металл – диэлектрик – полупроводник является метод, основанный на анализе зависимости емкости МДП-структуры  $C_{\text{МДП}}$  от напряжения на затворе  $V$ , так назы-

ваемый метод вольт-фарядных характеристик (ВФХ) или  $C$ - $V$  метод.

Емкость МДП-структуры представляет собой последовательное соединение емкости диэлектрика  $C_i$  и приповерхностной емкости полупроводника  $C_s$

$$\frac{1}{C_{i\bar{A}\bar{I}}} = \frac{1}{\tilde{N}_i} + \frac{1}{C_s}, \quad C_{i\bar{A}\bar{I}} = \frac{C_i C_s}{C_i + C_s}. \quad (4.1)$$

График зависимости емкости МДП-структуры от напряжения на затворе, так называемая вольт-фарядная характеристика МДП-структуры, приведен на рис. 4.4.

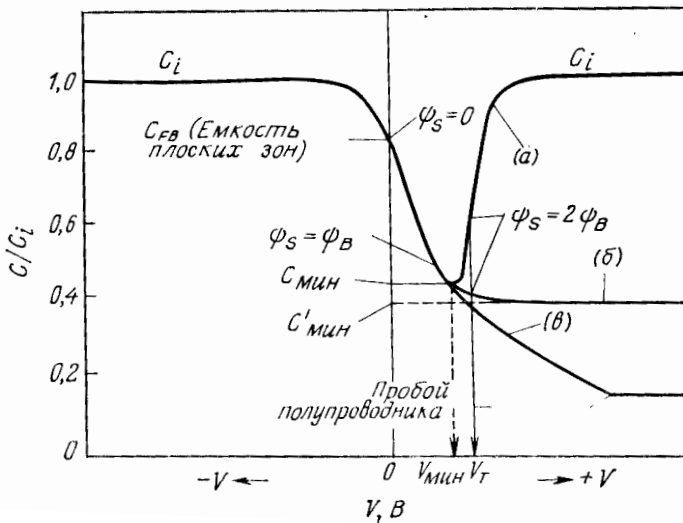


Рис. 4.4. Вольт-фарядные характеристики идеальной МДП-структуры:  $a$  – в области низких частот;  $b$  – в области высоких частот;  $v$  – в режиме глубокого обеднения

Если  $V < 0$  и полупроводниковая подложка имеет  $p$ -тип проводимости, то около поверхности полупроводника накапливаются дырки (режим аккумуляции, обогащения). В этом режиме дифференциальная емкость полупроводника существенно больше емкости диэлектрика, поэтому полная емкость структуры близка к величине емкости диэлектрика:

$$C_i = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_i}{d}. \quad (4.2)$$

Когда напряжение на затворе меняется в направлении напряжения плоских зон, поверхностное обогащение исчезает и вследствие роста длины Дебая у поверхности емкость начинает уменьшаться.

При переходе МДП-структуры в режим обеднения ( $V > 0$ ) дырки удаляются от поверхности, образуется ОПЗ и начинает сказываться влияние приповерхностной емкости  $C_s$ , значение которой зависит от напряжения на затворе. Обедненная область действует как добавочный слой диэлектрика. В этом режиме полная емкость МДП-структуры состоит из последовательно соединенных емкостей диэлектрика и приповерхностной обедненной области полупроводника

$$C_{i\bar{i}} = \left( \frac{1}{\tilde{N}_i} + \frac{W}{\varepsilon_s \varepsilon_0} \right)^{-1}, \quad (4.3)$$

где  $W$  – ширина приповерхностного обедненного слоя, которая зависит как от напряжения на затворе, так и концентрации примеси.

Из выражения (4.3) следует, что с увеличением ширины обедненной области полная емкость МДП-структуры уменьшается.

При превышении  $V$  значения порогового напряжения в МДП-структуре происходит инверсия проводимости приповерхностного слоя: поверхностная концентрация электронов в инверсионном слое растет экспоненциально с напряжением, а поверхностный потенциал увеличивается пропорционально квадрату толщины обедненной области. После того как значение  $W$  достигнет максимальной величины, дальнейшее приращение положительного заряда на затворе будет компенсироваться возрастанием концентрации электронов в канале. Появление избыточных электронов обеспечивается достаточно медленной генерацией электронно-дырочных пар в ОПЗ. Поэтому, если к постоянному напряжению на затворе  $V$  добавляется малое переменное напряжение  $dV$  с высокой частотой, то концентрация носителей в инверсионном слое (электронов) не успевает изменяться с частотой переменного напряжения и емкость МДП-структуры остается постоянной (рис. 4.4, кривая б).

Если же частота изменений  $V$  низкая, то изменение концентрации носителей в инверсионном слое (электронов) успевает следовать за изменением напряжения. Дифференциальная емкость инверсионного слоя значительно превышает емкость диэлектрика, поэтому полная емкость МДП-структуры в режиме инверсии резко возрастает, снова приближаясь к емкости диэлектрика (рис. 4.4, кривая а).

Рассмотрим теперь, как меняется емкость МДП-структуры при подаче на затвор импульса напряжения. Пусть в исходном состоянии напряжение на затворе равнялось нулю, если теперь к затвору «скачком» прикладывается положительное напряжение превышающее пороговое, то дырки удаляются от поверхности полупроводника и образуется ОПЗ. Однако инверсии проводимости не происходит, так как инерционный процесс генерации электронов не успевает за изменением напряжения. Вследствие того, что инверсионный слой отсутствует, положительный заряд на металлическом затворе

может быть скомпенсирован только ионами акцепторов в ОПЗ. Поэтому толщина ОПЗ увеличивается. Удельная емкость структуры в этом режиме по аналогии с (4.4) равна:

$$C_{i\bar{A}\bar{I}} = \left( \frac{1}{\tilde{N}_i} + \frac{W_{\max} + \Delta W}{\varepsilon_s \varepsilon_0} \right)^{-1}, \quad (4.5)$$

Фактически в выражении (4.5) отражено сохранение режима обеднения и при напряжениях на затворе, больших порогового. Толщина обедненной области под увеличивается на  $\Delta W$ , а значение емкости  $C_s$  и общей емкости МДП-структуры уменьшается (рис. 4.4, кривая *в*), при этом зависимость емкости затвора от напряжения на затворе аналогична зависимости барьерной емкости обратно-смещенного *p-n*-перехода от обратного напряжения.

При экспериментальном измерении вольт-фарадных характеристик МДП-структур важное значение имеет частота измерительного сигнала  $\omega$ . Это связано с тем, что процессы захвата и выброса на поверхностные состояния, а также изменения заряда свободных носителей в инверсионном слое, характеризующие емкость поверхностных состояний  $C_{ss}$  и емкость ОПЗ  $C_{sc}$ , имеют конечные времена  $\tau$ , сравнимые с периодом обычно используемого в эксперименте сигнала. Напомним, что изменение заряда  $Q_n$  в инверсионном слое характеризуется генерационно-рекомбинационным процессом и определяется временем жизни неосновных носителей  $\tau_n$  в ОПЗ. Характерное время захвата и выброса на поверхностные состояния определяется постоянной времени  $\tau$  этих состояний. В зависимости от частоты измерительного сигнала различают два метода – метод высокочастотных *C-V* характеристик и квазистатический *C-V* метод.

**Метод высокочастотных вольт-фарадных характеристик.** Для создания полевого эффекта в МОП-структуре необходимо подать напряжение на металлический затвор. (В



настоящей работе все напряжения отсчитываются от подложки). Напряжение на затворе перераспределит заряды, но сохранит их общий нулевой баланс. В идеальном случае заряд на металлическом затворе уравновешивается зарядами инверсионного и обедненного слоя (рис. 4.5, *a*). В реальной МОП-структуре (рис. 4.5, *б*) в этом балансе участвует также заряд диэлектрика, который влияет на приповерхностный изгиб зон и который надо учитывать, анализируя свойства МОП-приборов.

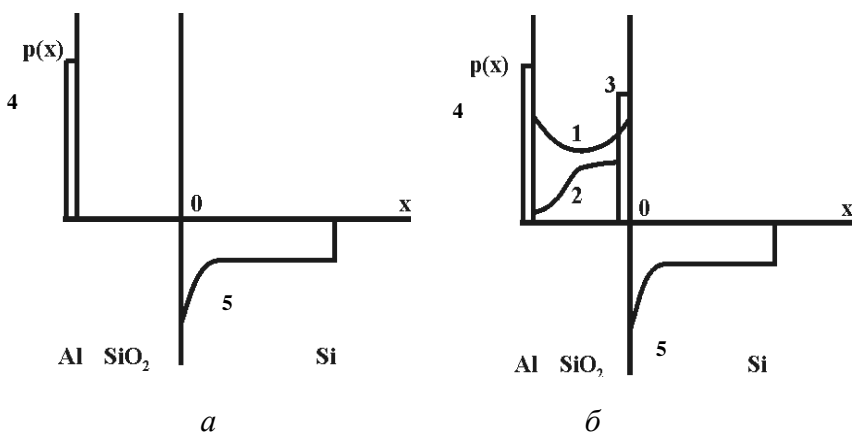


Рис. 4.5. Распределение заряда в идеальной (*a*) и реальной (*б*) МДП-структуре: 1, 2, 3 - заряд в диэлектрике; 4 - заряд на металлическом затворе; 5 - заряд инверсионного и обедненного слоя

Заряд в диэлектрике образован рядом компонентов, совместное присутствие которых описывается величиной  $Q_{ss \text{ эф}}$  и приводит к сдвигу высокочастотной ВФХ с деформацией (вытягиванием) вдоль оси напряжений (рис. 4.6). Величина сдвига равна  $\varphi_s + (Q_{ss \text{ эф}}/C_i)$ , где  $\varphi_s$  - поверхностный потенциал,  $C_i$  - удельная емкость изолятора.

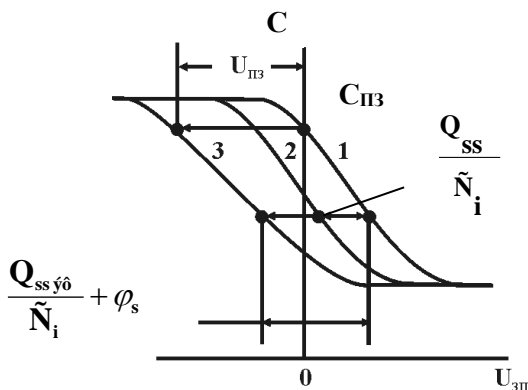


Рис. 4.6. Высокочастотная ВФХ: 1 - идеальная ВФХ; 2 - сдвиг ВФХ под действием только объемного заряда в окисле; 3 - реальная ВФХ, учитывающая все компоненты в окисле

### Методика измерения

Статические высокочастотные вольт-фарадные характеристики снимаются с помощью специального измерителя ВФХ, в котором есть источник регулируемого постоянного напряжения смещения и измерительный высокочастотный сигнал обеих полярностей.

Емкость измеряется на частоте 500 кГц, обеспечиваемой собственным генератором измерителя. Диапазон измерения от 10 до 500 пФ разбит на три поддиапазона, выбираемые ручкой *ПРЕДЕЛ ИЗМЕРЕНИЯ*. При отсчете емкости деления шкалы стрелочной головки переводятся в значения емкости по графику, укрепленному на верхней крышке измерителя. Исследуемая емкость подключается к клеммам  $C_x$ , одна из которых заземлена, а на другую может быть подано постоянное смещение от собственного источника измерителя. Знак смещения задается тумблером *ПОЛЯРНОСТЬ*, а величина - ручкой  $U_{\text{см}}$ . Постоянное напряжение может быть измерено внешним вольт-

тметром, подключенным к клеммам *ВНЕШНИЙ ВОЛЬТ-МЕТР*.

Для правильного задания полярности необходимо проследить за тем, чтобы шнур от «массы» зондовой головки был подключен к клемме «земля», тогда на другой клемме, ведущей к игле зонда, будет знак напряжения, определяемый тумблером ПОЛЯРНОСТЬ. Напряжение постоянного смещения измеряется внешним вольтметром на соответствующих клеммах. Показания стрелки прибора пересчитываются в емкость по калибровочной кривой, прилагаемой к прибору.

### Экспериментальное задание

1. Измерить статическую вольт-фарадную характеристику МОП-структуры.

2. Определить тип проводимости подложки. Высокочастотная (ВЧ) вольт-фарадная характеристика МОП-структуры с монополярным полупроводником имеет вид плавной ступеньки. При этом верхний уровень практически равен емкости диэлектрика  $C_{\max} = C_{ox}$  и соответствует области сильного обогащения ОПЗ полупроводника, а нижний определяется инверсной емкостью МДП-структуры  $C_{\min} = C_i$ . Если учесть, что знак управляющего напряжения  $U_3$  отсчитывается относительно металлического электрода (затвора), тип проводимости полупроводника легко идентифицируется:

- *n*-тип подложки: верхний уровень ступеньки ВФХ направлен в сторону  $(+U_3)$ , нижний в сторону  $(-U_3)$  (рис. 4.7, а);

- *p*-тип подложки: наоборот верхний уровень направлен в сторону  $(-U_3)$ , нижний в сторону  $(+U_3)$  (рис. 4.7, б).

2. Найти толщину диэлектрика. Толщину диэлектрика можно определить, используя формулу для емкости диэлектрика:

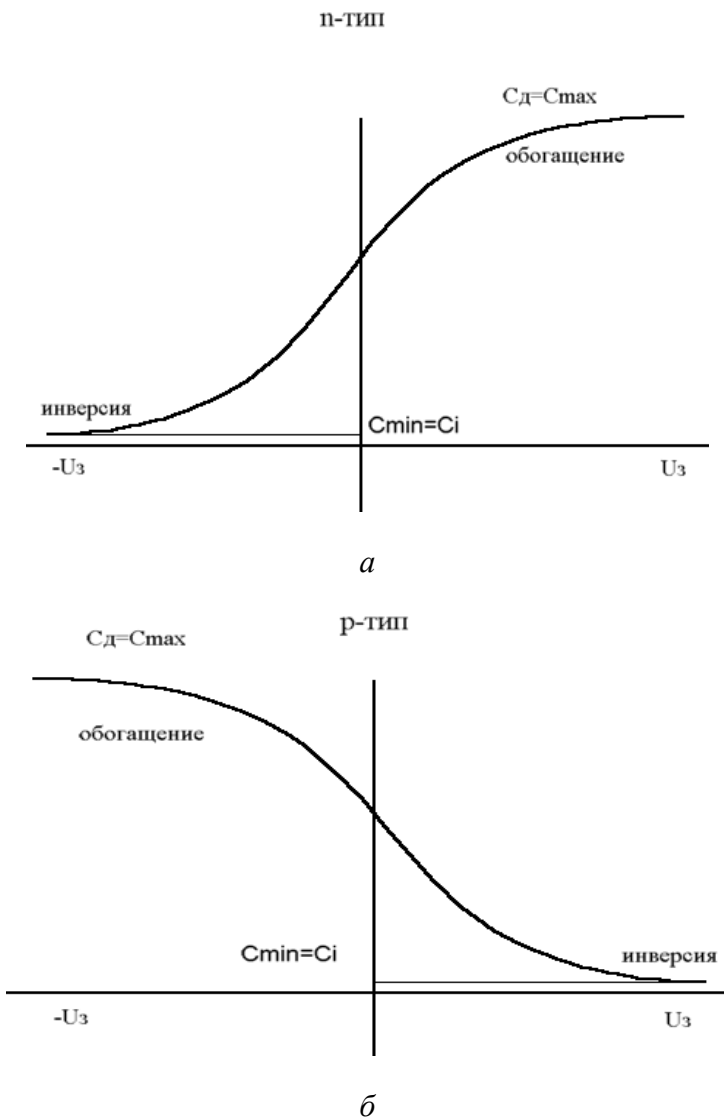


Рис. 4.7. Высокочастотная вольт-фарадная характеристика МОП-структуры для полупроводника *n*-типа (а) и *p*-типа (б)

отсюда

$$C_{\max} = C_{i\bar{o}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d_{ox}} \quad (4.6)$$
$$d_{i\bar{o}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{C_{\max}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{C_{ox}}$$

где  $C_{ox}$  - емкость диэлектрика;  $d_{ox}$  - толщина диэлектрика;  $S$  - площадь МОП - структуры,  $S = 1 \text{ мм}^2 = 10^{-2} \text{ см}^2 = 10^{-6} \text{ м}^2$ ;  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость диэлектрика  $\text{SiO}_2$ ,  $\varepsilon = 3,8$ ; диэлектрическая проницаемость вакуума,  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ .

3. Найти концентрацию легирующей примеси в подложке. Для этого перестроить вольт-фарадную характеристику в координатах  $1/C^2$  по оси  $y$  и  $U$  по оси  $x$ , найти  $dC^{-2}/dU$  и по следующей формуле определить  $N(x)$

$$N(x) = \frac{2}{q\varepsilon\varepsilon_0 S^2} \left[ \frac{dC^{-2}}{dU} \right]^{-1}. \quad (4.7)$$

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение идеальной МДП-структуры.
2. Назовите основные режимы смещения МДП-структуры. Нарисуйте зонные диаграммы идеальных МДП-структур, соответствующие этим режимам.
3. Нарисуйте графики ВФХ на низкой и высокой частотах измерительного сигнала и в импульсном режиме. Поясните понятие глубокого обеднения.
4. Изложите методику нахождения средней (эффективной) концентрации легирующей примеси в подложке.
5. Дайте определение порогового напряжения МДП-структуры.
6. Перечислите компоненты заряда в реальной двуокиси кремния. Поясните их влияние на свойства кремниевых МОП-приборов.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

### СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

**Цель работы:** исследование статических вольт-амперных характеристик полевых транзисторов с управляющим  $p$ - $n$ -переходом и МОП-транзисторов с встроенным каналом. Оценка основных статических и физико-топологических параметров исследуемых полевых транзисторов.

**Используемое оборудование и материалы:** характеристикограф, полевые транзисторы с управляющим  $p$ - $n$ -переходом, МОП-транзисторы с встроенным каналом, вольтметр.

#### Теоретическая часть

*Полевой транзистор* (ПТ) – это полупроводниковый прибор, в котором изменение тока происходит под действием перпендикулярного току электрического поля, создаваемого входным сигналом.

Протекание электрического тока в полевых транзисторах обусловлено носителями заряда только одного знака (электронами или дырками), поэтому такие транзисторы называют также *униполярными* в отличие от биполярных.

По физическим эффектам, лежащим в основе управления носителями заряда, полевые транзисторы бывают трех видов: с управляющим  $p$ - $n$ -переходом, с управляющим переходом металл-полупроводник и со структурой металл-диэлектрик-полупроводник (МДП-транзисторы).

*Полевой транзистор с управляющим  $p$ - $n$ -переходом* – полупроводниковый прибор, в котором ток основных носителей заряда управляется поперечным электрическим полем обратнo смещенного  $p$ - $n$ -перехода (или переходов).

Простейший полевой транзистор с управляющим  $p$ - $n$ -переходом состоит из полупроводниковой пластины, имею-

щей электропроводность определенного типа, от концов которой сделаны два вывода – электроды стока (С) и истока (И), с одним (рис. 5.1, а) или двумя  $p-n$ -переходами (рис 5.1, б) от которых сделан третий вывод – затвор (З).

Электрод, от которого начинают движение основные носители заряда в канале, называют **истоком**, а электрод, к которому движутся основные носители заряда, называют **стоком**. Условные обозначения даны на рис. 5.1, з, д, а одна из структур выпускаемых промышленностью полевых транзисторов на рис. 5.1, в. Действие этих транзисторов основано на зависимости толщины области пространственного заряда (ОПЗ)  $p-n$ -перехода от приложенного к нему напряжения.

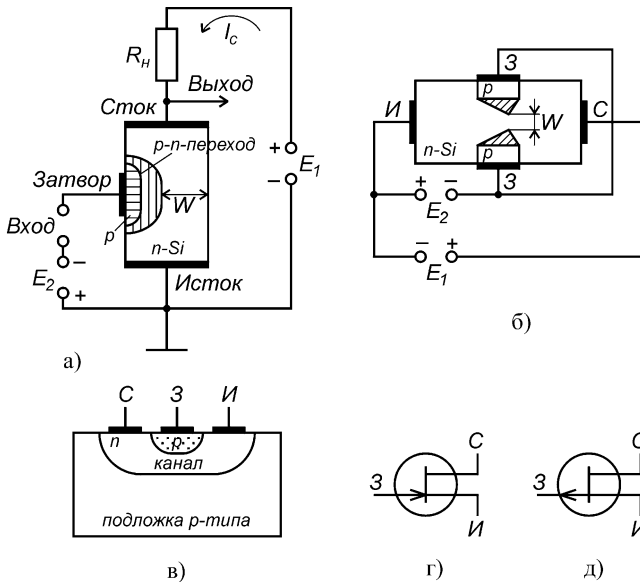


Рис. 5.1. Структура полевого транзистора с одним управляющим  $p-n$ -переходом (а); с двумя управляющими  $p-n$ -переходами (б); типовая структура (в) и условные обозначения транзистора с каналом  $n$ -типа (з) и  $p$ -типа (д)

При включении между истоком и стоком транзистора источника напряжения  $E_1$  (или  $E_{СИ}$ ) по каналу от истока к стоку потечет ток основных носителей (в данном случае – электронов), величина которых определяется приложенным напряжением и сопротивлением канала. Если на затвор транзистора подать напряжение  $E_2$  (или  $E_{ЗИ}$ ) так, чтобы  $p$ -переход (или переходы) оказались смещенными в обратном направлении, то переход (переходы) расширяясь, уменьшают ширину канала  $W$ . Уменьшение поперечного сечения канала приводит к увеличению его сопротивления и поэтому к уменьшению протекающего по каналу тока.

Напряжение на затворе, при котором канал полностью перекрывается и ток через него практически прекращается, называют **напряжением отсечки**  $U_{отс}$ . При этом напряжении остаются лишь токи утечки.

Зависимость тока стока  $I_C$  от напряжения стока  $U_{СИ}$  при постоянном напряжении на затворе ( $U_{ЗИ} = const$ ) определяется стоковой характеристикой (рис. 5.2). Ширина  $p$ -перехода зависит также от тока, протекающего через канал.

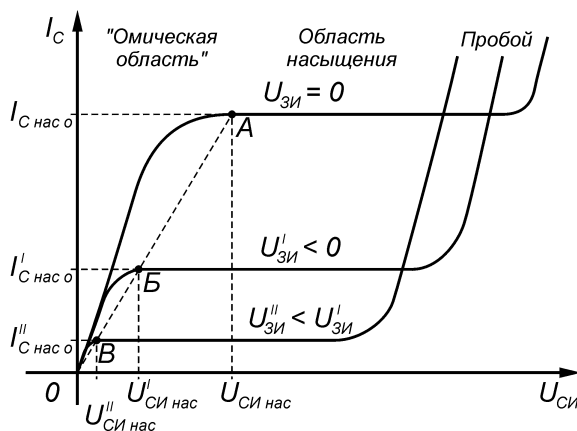


Рис. 5.2. Выходные характеристики полевого транзистора с управляющим  $p$ - $n$ -переходом



Если затвор закорочен с истоком ( $U_{зи} = 0$ ), а на сток подается положительное относительно истока напряжение, то падение напряжения в канале при протекании по нему потока электронов приводит к тому, что ширина  $p$ - $n$ -перехода увеличивается в направлении от истока к стоку, а ширина токопроводящего канала  $W$  соответственно уменьшается, т.е. ширина обедненного слоя в канале не одинакова по длине канала.

При увеличении напряжения стока  $U_{си}$  (при  $U_{зи} = 0$ ) увеличивается поток электронов к стоку, т.е. происходит рост тока стока  $I_C$ . Но это в свою очередь приводит к увеличению падения напряжения в канале, расширению обедненной носителями области  $p$ - $n$ -переходов, дальнейшему сужению канала и росту его сопротивления. В итоге рост тока  $I_C$  с увеличением напряжения  $U_{си}$  вначале замедляется, а затем практически прекращается. Дальнейшее повышение напряжения на стоке уже не приводит к росту тока  $I_C$ , т.к. одновременно с повышением  $U_{си}$  увеличивается и сопротивление канала, наступает своеобразное равновесие, при котором увеличение  $U_{си}$  и рост тока  $I_C$  вызывают дальнейшее сужение канала и соответственно уменьшение тока  $I_C$ . В результате этот ток остается практически постоянным. Напряжение, при котором наступает режим насыщения, называется **напряжением насыщения**. Оно, как видно из рис. 5.2, меняется при изменении напряжения на затворе. Область, в которой ток  $I_C$  существенно зависит от напряжения на стоке  $U_{си}$  (слева от пунктирной линии АБВ, рис. 5.2), называется **омической областью**; правая область, в которой ток  $I_C$  остается практически неизменным – **областью насыщения**.

Характеристики передачи полевого транзистора представляют собой зависимости тока стока от напряжения на затворе при различных постоянных напряжениях на стоке (рис. 5.3).

Одним из основных параметров полевого транзистора с управляющим  $p$ - $n$ -переходом является **крутизна передаточ-**

*ной характеристики* определяющая эффективность изменения тока в цепи стока при изменении напряжения на затворе.

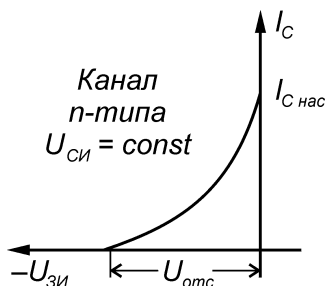


Рис. 5.3. Статическая характеристика передачи полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом

$$S = \left. \frac{dI_C}{dU_{ЗИ}} \right|_{U_{СИ} = \text{const}} \quad (5.1)$$

Максимальные значения крутизны характеристики при  $U_{ЗИ} = 0$  в реальных транзисторах равно порядка 20 мА/В.

К параметрам таких транзисторов относятся также **напряжение отсечки**  $U_{отс}$ ; **ток насыщения стока**  $I_{C нас}$  при  $U_{ЗИ} = 0$ ; **емкости**  $C_{СИ}$  и  $C_{ЗИ}$ ; **сопротивление транзистора в омической области**  $R_o$ , определяемое наклоном стоковой характеристики; **внутренне сопротивление**

$$R_i = dU_C / dI_C, \quad (5.2)$$

определяемое в области насыщения при различных напряжениях на затворе  $U_{ЗИ}$ ; а также **граничная частота**.

Схемы включения полевых транзисторов определяются по электроду, общему для входной и выходной цепей. Различают схемы включения: с общим истоком (ОИ), с общим стоком (ОС) и с общим затвором (ОЗ). Схема включения с общим

истоком (соответствует схеме включения с общим эмиттером для биполярных транзисторов) характеризуется наибольшим усилением по мощности и напряжению по сравнению с другими схемами включения.

У МДП-транзисторов в отличие от полевых транзисторов с управляющим  $p$ - $n$ -переходом металлический затвор изолирован от полупроводника слоем диэлектрика и имеется дополнительный вывод от кристалла, на котором выполнен прибор, называемый подложкой (рис. 5.4).

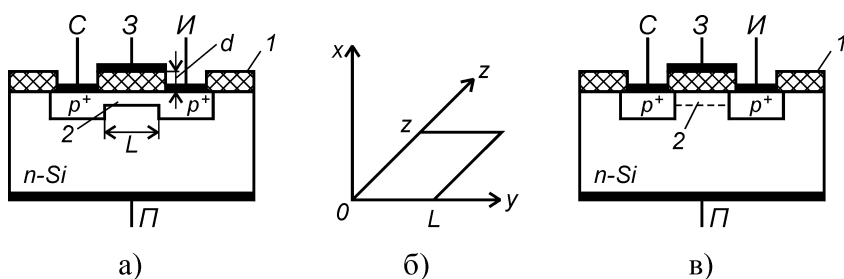


Рис. 5.4. МДП-транзистор с каналом  $p$ -типа:  $a$  – планарный транзистор со встроенным каналом;  $b$  – геометрические размеры канала;  $в$  – планарный транзистор с индуцированным каналом; 1 – диэлектрик; 2 – канал

В этих транзисторах управляющий электрод, т.е. – затвор, отделен от канала тонким слоем диэлектрика (0,05 – 0,20 мкм) и допускает приложения напряжения любой полярности. Если в качестве диэлектрика применен оксид кремния, то эти транзисторы называются МОП-транзисторы (т.е. со структурой металл–оксид–полупроводник).

МДП-транзисторы по способу образования канала подразделяются на транзисторы со встроенным каналом, (канал создается при изготовлении) и с индуцированным каналом (канал возникает под действием напряжения, приложенного к управляющим электродам). Важными параметрами МДП-транзистора являются длина канала  $L$  (обычно 0,1 – 5 мкм),

ширина канала  $z$  (на рис. 5.4, б), толщина диэлектрика (изолятора)  $d$  с диэлектрической постоянной  $\varepsilon_i$  и проводимость канала.

Физической основой работы полевого транзистора со структурой металл – диэлектрик – полупроводник (МДП) является эффект поля. В полевых приборах с МДП-структурой внешнее поле обусловлено приложенным напряжением на металлический электрод – затвор. В зависимости от знака и величины приложенного напряжения присутствуют четыре состояния области пространственного заряда (ОПЗ) полупроводника – обогащение, обеднение, слабая и сильная инверсия.

Полевые транзисторы в активном режиме могут работать только в области слабой или сильной инверсии, т.е. в том случае, когда инверсионный канал между истоком и стоком отделен от объема подложки слоем обеднения.

В области инверсии концентрация неосновных носителей заряда в канале выше, чем концентрация основных носителей в объеме полупроводника. Изменяя величину напряжения на затворе, можно менять концентрацию свободных носителей в инверсионном канале и тем самым модулировать сопротивление канала. Источник напряжения в стоковой цепи вызовет изменяющийся в соответствии с изменением сопротивления канала ток стока и тем самым будет реализован эффект усиления. Таким образом, МДП-транзистор является сопротивлением, регулируемым внешним напряжением.

МДП-транзисторы могут быть с  $p$ - и  $n$ -каналами. Условные графические обозначения МДП-транзисторов показаны на рис. 5.5. Стрелка во внутрь круга указывает на  $n$ -тип канала; стрелка из круга на канал  $p$ -типа.

МДП-транзисторы характеризуются в основном теми же параметрами, что и полевые транзисторы с управляющим  $p$ - $n$ -переходом. Основные параметры МДП-транзисторов и их ориентировочные значения следующие:

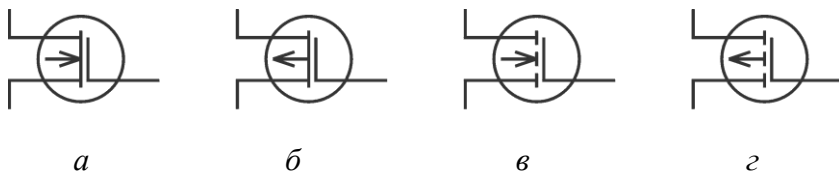


Рис. 5.5. Условные графические обозначения МДП-транзисторов со встроенным каналом (а, б) и с индуцированным каналом (в, г)

а) **крутизна характеристики**  $S = dI_C / dU_{ЗИ}$  при  $U_{СИ} = const$ . Обычно  $S = 0,1 - 500$  мА/В;

б) **начальный ток стока**  $I_{C нач}$  – ток стока при нулевом напряжении  $U_{ЗИ}$  у транзисторов со встроенным каналом  $I_{C нач} = 0,1 - 100$  мА; с индуцированным каналом  $I_{C нач} = 0,01 - 0,5$  мкА;

в) **напряжение отсечки**  $U_{ЗИ отс}$ . Обычно  $U_{ЗИ отс} = 0,2 - 10$  В;

г) **пороговое напряжение**  $U_{ЗИ пор}$ . Обычно  $U_{ЗИ пор} = 1 - 6$  В;

д) **сопротивление сток–исток в открытом состоянии**  $R_{СИ отк}$ ,  $R_{СИ отк} = 2 - 200$  Ом;

е) **максимальный ток стока**  $I_{C max}$ . Обычно имеет величину от 10 мА до 0,2 А;

ж) **максимальная частота усиления**  $f_{max}$  – частота, на которой коэффициент усиления по мощности  $K_P$  равен единице; величина  $f_{max}$  – десятки – сотни МГц.

Устройство транзистора с встроенным  $p$ -каналом схематично представлено на рис. 5.4, а. Основой является пластина слаболегированного кремния с электропроводностью  $n$ -типа. Области стока и истока обладают электропроводностью  $p^+$ -типа и соединены узкой слаболегированной областью кремния с электропроводностью  $p$ -типа, являющейся встроенным каналом. Затвор представляет собой металлический слой, изолированный от канала тонким диэлектриком толщиной  $d$ . В

транзисторе со встроенным каналом происходит расширение или сужение имеющегося канала в результате приложения отрицательного или положительного напряжения соответственно. При положительном напряжении на затворе дырки отесняются из области канала в объем полупроводника. Канал обедняется носителями заряда, сужается к стоку. При подаче на затвор отрицательного напряжения происходит обогащения дырками объема канала, он расширяется и его проводимость возрастает. Таким образом, изменяя напряжение на затворе, можно изменять проводимость канала, т.е. ток, проходящий через этот канал.

В транзисторах со встроенным каналом ток в цепи стока будет протекать и при нулевом напряжении на затворе (рис. 5.6). Для прекращения его необходимо к затвору приложить положительное напряжение (для транзистора с каналом  $p$ -типа), равное напряжению  $U_{ЗИ\text{ отс}}$ . При приложении отрицательного напряжения канал расширяется и ток увеличивается.

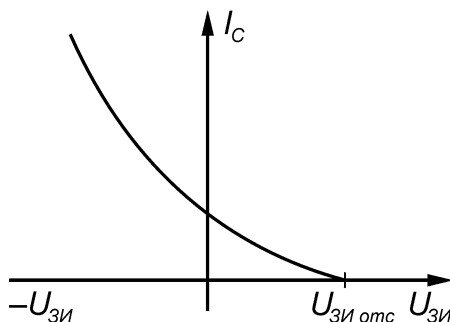


Рис. 5.6. Стокзатворная характеристика МДП-транзистора со встроенным каналом

Выходные характеристики МДП-транзисторов аналогичны характеристикам полевых транзисторов с управляющим  $p$ - $n$ -переходом (рис. 5.7). В них можно выделить крутую (I) и пологую области (II), а также область пробоя (III).

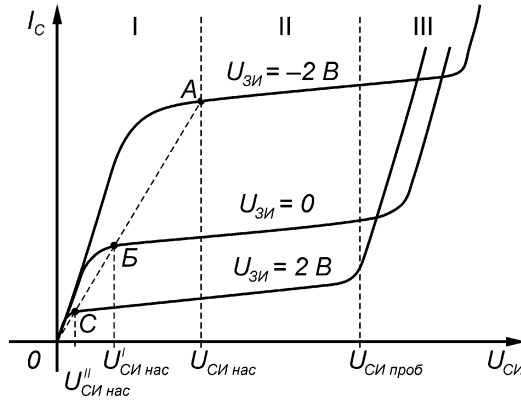


Рис. 5.7. Выходные характеристики МДП-транзистора с встроенным каналом  $p$ -типа: I – крутая, или «омическая», область; II – пологая или насыщенная область; III – область пробоя

В области I транзистор может работать как электрически управляемое сопротивление. Пологая область II обычно используется при построении усилительных каскадов. При увеличении напряжения  $U_{СИ}$  ширина канала уменьшается вследствие подъема на нем напряжения и изменения результирующего электрического поля. Это особенно сильно проявляется в той части канала, которая находится вблизи стока.

При напряжении  $U_{СИ нас}$  канал вблизи стока становится настолько узким, что наступает динамическое равновесие, когда увеличение напряжения  $U_{СИ}$  вызывает уменьшение ширины канала и повышение его сопротивления. В итоге значение тока  $I_C$  достигает насыщения при увеличении напряжения  $U_{СИ}$ .

Структура МДП - транзистора с индуцированным  $p$ -каналом показана на рис. 5.4, в. В качестве исходного материала транзистора использован кремний  $n$ -типа. Чаще всего диэлектриком является оксид кремния  $SiO_2$ . В оксиде кремния всегда содержится положительно заряженные ионы натрия,

калия, водорода, осаждаемые на поверхность кремния в процессе выполнения технологических операций. Положительный заряд в пленке оксида кремния наводит (индуцирует) у поверхности  $n$ -области слой, в котором концентрация электронов выше, чем в объеме  $n$ -области. При подаче на затвор отрицательного напряжения  $U_{ЗИ}$  электроны поверхностного слоя отталкиваются в глубь полупроводника, а дырки движутся к поверхности. Приповерхностный слой приобретает дырочную электропроводность, т.е. появляется тонкий инверсный слой, соединяющий сток с истоком, который играет роль канала. Толщина индуцированного канала составляет всего 1 – 5 нм. При приложении напряжения между истоком и стоком дырки, перемещаясь по каналу, создают ток стока. Изменяя напряжение на затворе, можно расширять или сужать канал, увеличивая или уменьшая ток стока.

Напряжение на затворе, при котором индуцируется канал, называют **пороговым напряжением**  $U_{ЗИ\ пор}$  (рис. 5.8, а).

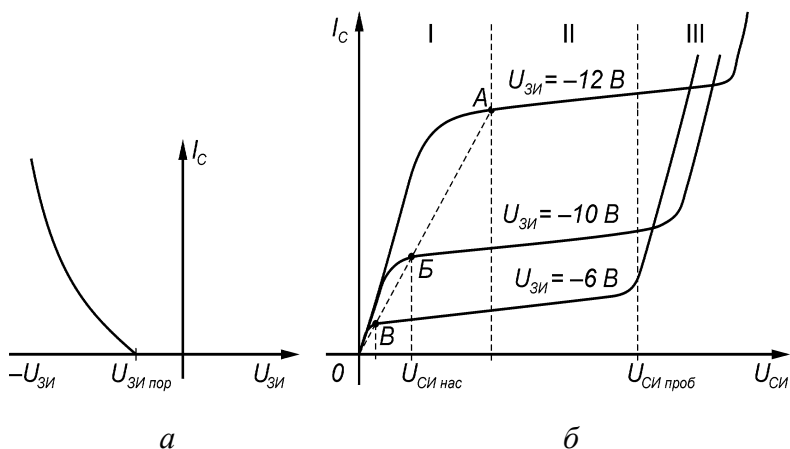


Рис. 5.8. Стокозатворные (а) и выходные (б) характеристики МДП-транзисторов с индуцированным  $p$ -каналом



Вид выходных характеристик этих транзисторов (рис. 5.8, б) аналогичен выходным характеристикам МДП-транзисторов со встроенным  $p$ -каналом. Разница состоит в том, что напряжение затвор-исток всегда отрицательное, т.е.  $U_{ЗИ} < 0$ . Наблюдаются те же три области: омическая, насыщения и пробоя.

### Экспериментальное задание

Записать типы и марки исследуемых транзисторов. Проанализировать полярности напряжений при включения транзисторов по схеме с общим истоком. Ознакомиться с порядком работы с характериографом (см. приложение).

#### **1. Полевой транзистор с управляющим $p$ - $n$ -переходом (ПТУП).**

1.1. Снять семейство выходных ВАХ ПТУП по схеме с общим истоком (4 -5 кривых).

1.2. Снять передаточную ВАХ ПТУП, перестроив выходные ВАХ с экрана осциллографа.

По результатам измерения отсчитать крутизну и выходное сопротивление транзистора по формулам (5.1) и (5.2).

#### **2. МОП-транзистор со встроенным каналом.**

2.1. Снять семейство выходных ВАХ МОПТ со встроенным каналом по схеме с общим истоком (4 - 5 кривых). Предусмотреть на затворе нулевое напряжение и напряжение запирающей полярности.

2.2. Снять передаточную ВАХ МОПТ со встроенным каналом, перестроив выходные ВАХ с экрана осциллографа, при нулевом напряжении исток - подложка и при двух значениях обратного напряжения  $U_{ин}$  (2 - 3 кривых), отметив для каждой кривой напряжение отсечки.

По результатам измерения отсчитать крутизну и выходное сопротивление транзистора по формулам (5.1) и (5.2).

## Контрольные вопросы

1. Перечислите основные типы полевых транзисторов.
2. Нарисуйте устройство ПТУП. В чем его сходство и отличие от полевого транзистора Шоттки?
3. Нарисуйте и объясните выходную ВАХ ПТУП в схеме с общим истоком.
4. Нарисуйте и объясните передаточную ВАХ ПТУП в схеме с общим истоком и приведите выражение для ее крутизны.
5. Дайте классификацию основных типов МДП-транзисторов и нарисуйте для них схематически разрезы структур.
6. Нарисуйте и объясните выходные ВАХ МДП-транзистора с  $n$ - и  $p$ -каналами в схеме с общим истоком.
7. Нарисуйте и объясните передаточные ВАХ МДП-транзистора с индуцированным и встроенным  $n$ - каналами. В чем разница между ними?
8. Дайте определение и запишите выражение для крутизны ВАХ МДП-транзистора.
9. Объясните влияние напряжения  $U_{ин}$  на передаточную ВАХ в схеме с общим истоком.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### ПОРЯДОК РАБОТЫ С ХАРАКТЕРИОГРАФОМ

Характериограф предназначен для наблюдения выходной статической вольт-амперной характеристики на экране осциллографа и состоит из блока характерографа и осциллографа. Принцип действия его состоит в следующем.

Пусть исследуемый прибор представлен в общем виде как четырехполюсник, у которого один провод является общим для входа и выхода. Упрощенная схема измерения показана на рис. П.1.



Рис. П.1. Упрощенная схема характерографа. Испытуемый прибор представлен четырехполюсником.  
СМ – схема масштабирования координаты X

Для снятия выходной ВАХ напряжение развертки, то есть переменное напряжение требуемой полярности, с блока характерографа подается одновременно на выход четырехполюсники и на вход горизонтальной развертки осциллографа (клеммы  $U_{вых}$ , оси X). Обратим внимание на то, что обычно в режиме наблюдения зависимости сигнала от времени горизонтальная развертка осциллографа осуществляется его собственным генератором пилообразного напряжения. Для сня-

тия ВАХ, когда управление горизонтальной разверткой должно быть передано блоку характеристикографа, необходимо поставить переключатель ВХОД  $X$  на осциллографе в соответствующее положение. На вход вертикальной развертки осциллографа надо подать ток через прибор. Однако ввиду высокого входного сопротивления осциллографа ток измеряется как падение напряжения на известном резисторе нагрузки  $R_n$ , подаваемое на ось  $Y$  (клемма оси  $Y$ ). Наконец, чтобы можно было наблюдать зависимость выходной характеристики исследуемого прибора от управляющего сигнала, на вход четырехполюсника подается постоянное напряжение (клемма  $U_{вх}$ ), а протекающий при этом в четырехполюсник постоянный ток  $I_{вх}$  измеряется миллиамперметром.

Какая конкретно из выходных характеристик будет сниматься – зависит от включения измеряемого прибора, представленного здесь в виде четырехполюсника. Например, при включение транзистора по схеме с общим эмиттером (рис. П.2, *а*) будет сниматься зависимость  $I_k(U_{кэ})$ . Если измеряемый прибор не имеет цепей управления, то входные клеммы не используются (рис. П.2, *б*). Если измеряемый прибор управляется полем пример, полевой транзистор, (рис. П.2, *в*), то ток в его входной цепи протекать не должен, а входное напряжение может быть измерено на клеммах  $U_{вх}$ .

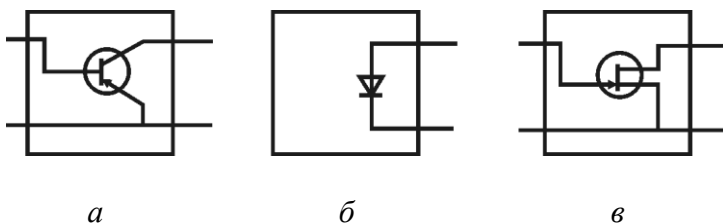


Рис. П.2. Варианты включения используемых приборов:  
*а* – биполярный транзистор в схеме с общим эмиттером;  
*б* – диод; *в* – полевой транзистор с общим истоком

Лицевая панель блока характериографа показана на рис. П.3. Она может быть разделена на четыре части: ОСЦИЛЛОГРАФ, ВХОД, ПОДЛОЖКА и ВЫХОД.

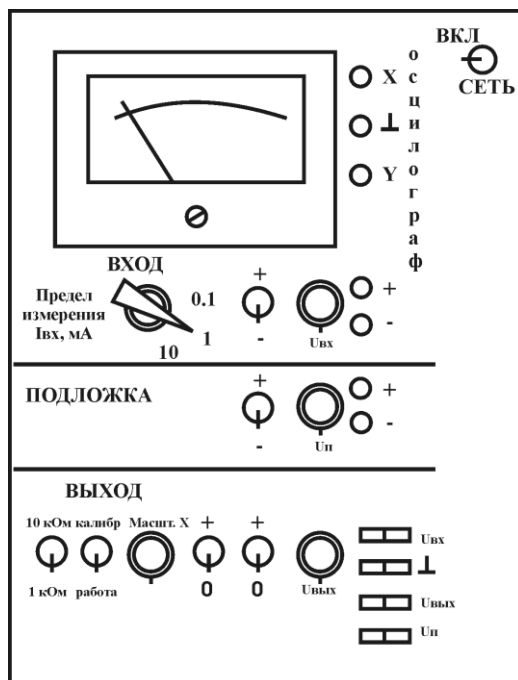


Рис. П.3. Лицевая панель характериографа

Стрелочная головка показывает постоянный ток на входе исследуемого четырехполосника. Верхний ряд ручек (ВХОД) относится к входной части прибора: переключатель слева позволяет выбрать предел измерения входного тока в миллиамперах. Тумблером “+/-” задается полярность, а ручкой “ $U_{вх}$ ” – амплитуда входного напряжения. С клемм справа можно измерить напряжение внешним вольтметром.

Средний ряд ручек (ПОДЛОЖКА) предназначен для подачи независимого смещения на подложку МДП-транзистора. Слева направо: тумблер выбора полярности напряжения, ручка управления величиной напряжения и пара клемм для его измерения. Этот источник может быть использован и для других целей в качестве дополнительного автономного источника постоянного напряжения.

Нижний ряд ручек (ВЫХОД) относится к выходу исследуемого прибора. Выходной ток прибора  $I_{вых}$  пропускается через нагрузочный резистор  $R_n$  величиной 1 или 10 кОм (тумблер НАГРУЗКА), а падение напряжения на этом резисторе выдается на клемму “У” осциллографа. Ток через прибор можно получить, отсчитав напряжение по вертикальной оси с экрана осциллографа и разделив его на величину  $R_n$ . Ввиду того, что в целях повышения точности измерения между выходным сопротивлением измеряемого прибора  $R_{вых}$  и сопротивлением нагрузки должно быть обеспечено условие  $R_{вых} \gg R_n$ , следует выбирать предел  $R_n = 1$  кОм, если только выбор нужных пределов измерения осциллографа позволяет наблюдать требуемые кривые на его экране.

Тумблер КАЛИБРОВКА – РАБОТА вместе с ручкой МАСШТАБ позволяет установить масштаб напряжений по оси X осциллографа. Двумя тумблерами правее выбирается правая или левая полуось на оси напряжений либо вся ось напряжений, а ручкой “ $U_{вых}$ ” регулируется величина выходного напряжения. В характернографе использована сетевая частота развертки выходного напряжения – 50 Гц.

Для выбора масштаба напряжения по оси X надо перенести тумблер КАЛИБРОВКА – РАБОТА в положение КАЛИБРОВКА. При этом в качестве измеряемого прибора будет выбран эталонный стабилитрон, находящийся внутри характернографа. Затем следует выбрать всю ось напряжений, включив оба тумблера “0/–”, “0/+” в нижнем ряду, и ручкой  $U_{вых}$  медленно повышать выходное напряжение на эталонном стабилитроне до появления на ВАХ двух вертикальных участков.

Напряжение между этими участками равно 10 В. Во избежание порчи эталонного стабилитрона не следует пропускать через него большой ток, то есть не следует делать вертикальные участки слишком протяженными. Далее ручкой МАСШТАБ выбрать требуемый масштаб по оси X, снять выходное напряжение и переключить тумблер КАЛИБРОВКА – РАБОТА в положение РАБОТА. При этом характериограф переключится с внутреннего стабилитрона к испытываемому прибору. Выбрав нужные полярности напряжений, можно теперь исследовать прибор, однако ручку МАСШТАБ трогать уже не следует.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: в 2-х кн.: пер. с англ. / С. Зи. М.: Мир, 1984.
2. Крутякова М.Г. Полупроводниковые приборы и основы их проектирования / М.Г. Крутякова, Н.А.Чарыков, В.В. Юдин. М.: Радио и связь, 1983. 352 с.
3. Маллер Р. Элементы интегральных схем /Р. Маллер, Т. Кейминс. М.: Мир, 1989. 630 с.
4. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника / Л. Росадо. М.: Высш. шк., 1991. 351 с.
5. Пасынков В.В. Полупроводниковые приборы: учебник для вузов / В.В. Пасынков, Л.К. Чиркин. СПб.: Лань, 2003. 480 с.
6. Свистова Т.В. Приборы твердотельной электроники: учеб. пособие / Т.В. Свистова. Воронеж: ВГТУ, 2012. 294 с.
7. Свистова Т.В. Твердотельная электроника: учеб. пособие / Т.В. Свистова. Воронеж: ВГТУ, 2006. Ч. 1. 193 с.
8. Свистова Т.В. Твердотельная электроника: учеб. пособие / Т.В. Свистова. Воронеж: ВГТУ, 2006. Ч. 2. 173 с.
9. Тугов Н.М. Полупроводниковые приборы / Н.М. Тугов, Б.А. Глебов, Н.А. Чарыков. М.: Энергоатомиздат, 1990. 576 с.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ № 3 - 5 по дисциплине  
«Физические основы электроники»  
для студентов направления подготовки бакалавров  
210100 «Электроника и наноэлектроника»,  
профиля «Микроэлектроника и твердотельная электроника»  
заочной формы обучения

Составитель  
Свистова Тамара Витальевна

В авторской редакции

Подписано к изданию 10.10.2013

Уч.-изд. л. 2,7.

Объем данных 1,97 Мб.

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный  
технический университет»  
394026 Воронеж, Московский просп., 14