

## 1.15. ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

**Цель лекции:** ознакомление с понятием поверхностных явлений.

### 1.15.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЯХ

Рассмотрим процессы на поверхности полупроводника. В 1932 г. советским ученым И.Е. Таммом было показано, что обрыв кристаллической решетки приводит к возникновению разрешенных уровней в запрещенной зоне. Уровни Тамма возможны для идеальной поверхности полупроводника. Реальные поверхности покрыты слоем адсорбированных атомов и молекул. Эти примеси также создают поверхностные уровни, которые могут быть как донорными, так и акцепторными. Роль примесей могут играть и различные дефекты решетки. Разрешенные уровни в запрещенной зоне полупроводника на его поверхности называются поверхностными уровнями, или поверхностными состояниями.

При высокой плотности поверхностных состояний они, взаимодействуя друг с другом, могут размыться в поверхностную зону. Электроны в этой зоне движутся только вдоль поверхности.

Поверхностные состояния могут захватывать электроны или, наоборот, отдавать их, заряжаясь положительно или отрицательно. Зарядение поверхности полупроводника при заполнении поверхностных состояний сопровождается возникновением у поверхности слоя объемного заряда, нейтрализующего поверхностный заряд. Нейтрализация происходит путем притяжения к поверхности носителей со знаком заряда, противоположным знаку заряда поверхности, и отталкивания носителей одного знака. Вследствие этого поверхностный слой обедняется носителями того знака, которым заряжена поверхность, и обогащается носителями противоположного знака. При этом наблюдается изгиб зон и возникает поверхностный объемный заряд. Если поверхность полупроводника заряжена отрицательно, то в приповерхностном слое зоны изгибаются вверх, а если положительно, то вниз.

### 1.15.2. ЭФФЕКТ ПОЛЯ. МЕТАЛЛ–ДИЭЛЕКТРИК–ПОЛУПРОВОДНИК-СТРУКТУРЫ

Измерять объемный поверхностный заряд полупроводника можно с помощью электрического поля, перпендикулярного поверхности. Для создания такого поля в полупроводнике, как правило, используют МДП-структуры (рис. 1.54).

Если к идеальной МДП-структуре приложить положительное или отрицательное напряжение, то в приповерхностной области полупроводника могут возникнуть три состояния: обеднение, инверсия и обогащение этой области носителями заряда.

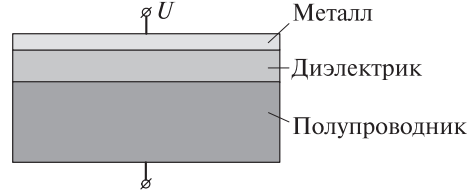


Рис. 1.54. Схема МДП-структуры

Обедненная основная носителями область появляется в случае, когда на металлический электрод подается потенциал, по знаку совпадающий с основными носителями заряда (рис. 1.55, а, б). Вызванный таким потенциалом изгиб зон приводит к увеличению расстояния от уровня Ферми до дна зоны проводимости в полупроводнике  $n$ -типа и до потолка валентной зоны в полупроводнике  $p$ -типа. Увеличение этого расстояния сопровождается обеднением приповерхностной области основными носителями.

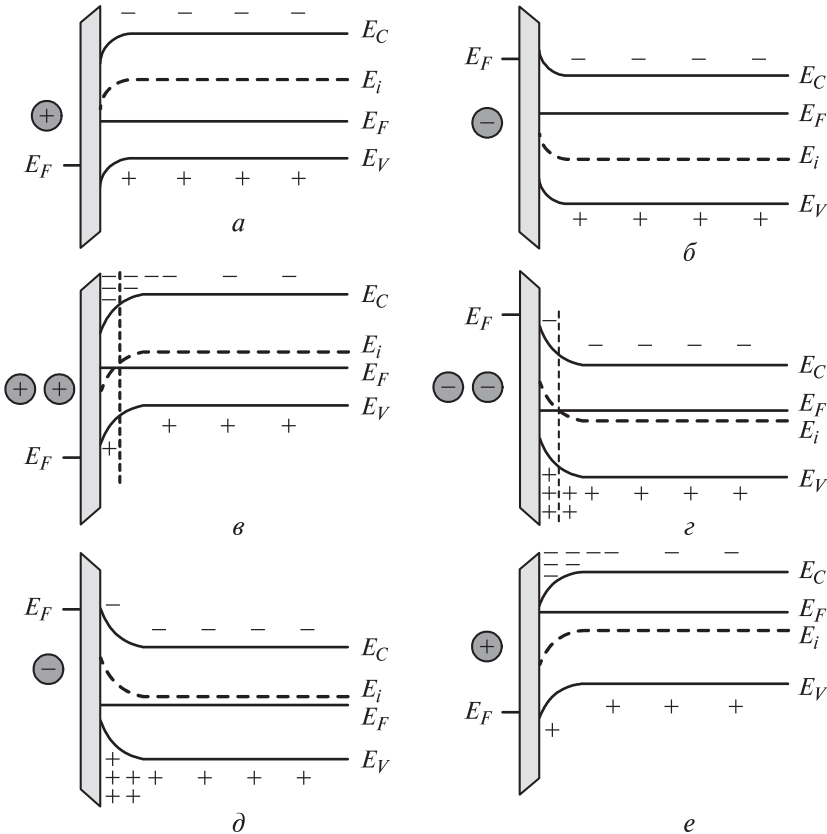


Рис. 1.55. Зонные диаграммы МДП-структур (выделены тоном) в режимах обеднения, инверсии и обогащения

Если на металлический электрод подается достаточно большой потенциал, совпадающий по знаку с основными носителями (рис. 1.55, в, з), то расстояние от уровня Ферми до потолка валентной зоны в полупроводнике  $n$ -типа оказывается меньше расстояния до дна зоны проводимости (рис. 1.55, з), вследствие чего концентрация неосновных носителей заряда (дырок) у поверхности полупроводника становится выше концентрации основных носителей, и тип проводимости этой области изменяется. Изменение типа проводимости полупроводника называется инверсией, а слои, в которых она наблюдается, называются инверсионными слоями.

Если знак потенциала металлического электрода противоположен знаку заряда основных носителей тока в полупроводнике, то происходит притяжение основных носителей к поверхности и обогащение ими приповерхностного слоя (рис. 1.55, д, е).

С изменением концентрации основных носителей под действием внешнего поля в приповерхностном слое изменяется также проводимость. Явление изменения поверхностной проводимости под действием поперечного поля называется эффектом поля.

### 1.15.3. ВОЛЬТ-ФАРАДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Рассмотрим емкость МДП-структуры с полупроводником  $n$ -типа при изменении напряжения смещения на металлическом электроде при наложении переменного сигнала.

В режиме обогащения в МДП-структуре с полупроводником  $n$ -типа (плюс на металлическом электроде) электроны притягиваются к поверхности, и в приповерхностном слое полупроводника возникает заряд  $Q_S$  притянутых электронов, по абсолютной величине равный заряду  $Q_M$ , индуцируемому на металлическом электроде (рис. 1.56). С увеличением напряжения толщина заряженного слоя сохраняется практически неизменной, и рост заряда  $Q_S$  происходит за счет повышения объемной плотности, поэтому емкость структуры не зависит от приложенного напряжения.

В состоянии обеднения электроны отталкиваются от поверхности полупроводника, и в приповерхностном слое образуется неподвижный заряд ионизированных доноров  $Q_C = qN_d d_{\text{ОПЗ}}$ , где  $d_{\text{ОПЗ}}$  — толщина области поверхностного заряда (ОПЗ) (рис. 1.57). Емкость такой структуры будет складываться из емкостей двух последовательно соединенных конденсаторов: конденсатора, образованного диэлектрическим слоем  $d_D$ , и конденсатора, образованного обедненным слоем  $d_{\text{ОПЗ}}$ .

Емкости этих конденсаторов при единичной площади

$$C_D = \frac{\epsilon_0 \epsilon_D}{d_D}; \quad C_{\text{ОПЗ}} = \frac{\epsilon \epsilon_{\text{П}}}{d_{\text{ОПЗ}}}.$$

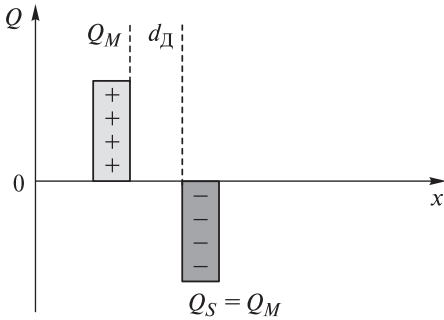


Рис. 1.56. Структура зарядов в режиме обогащения

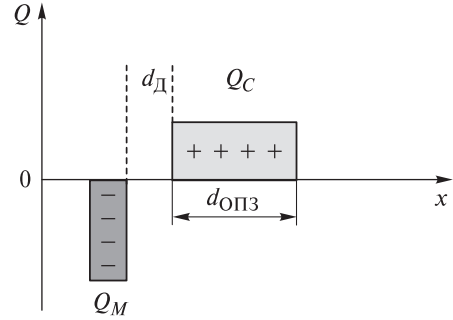


Рис. 1.57. Структура зарядов в режиме обеднения

Емкость  $C_{\text{ОПЗ}}$  зависит от падающей на полупроводнике разности потенциалов, так как с ее изменением изменяется толщина обедненного слоя  $d_{\text{ОПЗ}}$ , играющая роль расстояния между обкладками конденсатора.

Емкость структуры в целом составит

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{\text{д}}} + \frac{1}{C_{\text{ОПЗ}}};$$

$$C = \frac{C_{\text{д}} C_{\text{ОПЗ}}}{C_{\text{д}} + C_{\text{ОПЗ}}}.$$

С ростом напряжения смещения ширина ОПЗ увеличивается, вследствие чего емкость  $C_{\text{ОПЗ}}$  уменьшается. При этом уменьшается и общая емкость. Это происходит до наступления инверсии. В состоянии инверсии к поверхности полупроводника притягиваются дырки, образуя положительный заряд  $Q_{\text{р}}$  (рис. 1.58). До наступления инверсии рост заряда в полупроводнике  $Q_{\text{п}}$  определяется ростом заряда ОПЗ и увеличением  $d_{\text{ОПЗ}}$ , а после наступления инверсии — ростом заряда  $Q_{\text{р}}$ . Поскольку толщина инверсного слоя, образованного дырками, почти не зависит от приложенного напряжения, в состоянии инверсии емкость структуры не зависит от напряжения.

На рис. 1.59 приведена вольт-фарадная характеристика МДП-структуры. Минимум кривой  $C = f(U)$  соответствует образованию инверсного слоя и характеризуется напряжением инверсии  $U_{\text{ин}}$ .

При высокочастотном (ВЧ) сигнале емкость полупроводника определяется

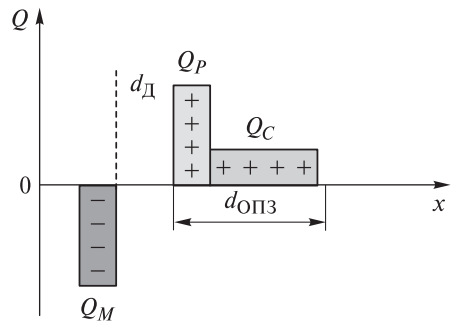
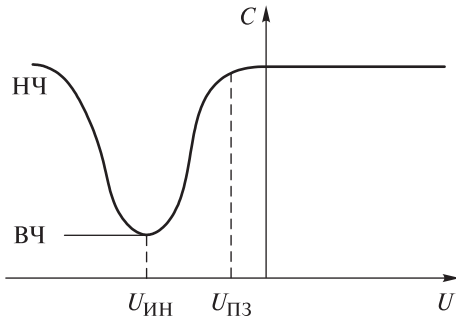


Рис. 1.58. Структура зарядов в режиме инверсии



**Рис. 1.59.** Вольт-фарадная характеристика МДП-структуры с полупроводником  $n$ -типа

емкостью ОПЗ и не зависит от заряда дырок, а так как после образования инверсного слоя ширина ОПЗ не изменяется, то  $C = f(U)$  остается постоянной. При низкочастотном (НЧ) сигнале емкость полупроводника определяется в этом случае зарядом дырок в инверсном слое, который быстро растет с напряжением. Следовательно, возрастает и общая емкость структуры, вплоть до  $C \cong C_d$ . Затем  $C$  не изменяется с ростом напряжения, так как емкость структуры определяется емкостью  $C_d$ , которая в этом случае меньше емкости полупроводника  $C_p$ .

Кроме рассмотренных выше, в МДП-структуре могут возникать заряд на поверхностных состояниях  $Q_{SS}$  и заряд в диэлектрике, которые приводят к сдвигу ВФХ вправо или влево по оси напряжений.

#### 1.15.4. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Основные принципы работы полевого транзистора были разработаны Лиленфельдом и Хейлом в начале 1930-х годов. Первый МДП-транзистор был изготовлен Кангом и Аталлой в 1960 г. Полевой транзистор с управляющим  $p$ - $n$ -переходом разработан Шокли в 1952 г. и изготовлен Дейки и Россом в 1953 г. Полевые транзисторы с диодом Шоттки впервые были изготовлены на основе арсенида галлия в 1967 г.

Полевые транзисторы содержат три полупроводниковые области: исток, сток и канал, а также управляющий электрод — затвор. Исток и сток — сильно легированные области полупроводника.

По структуре и способу управления проводимостью канала различают три типа полевых транзисторов:

- с изолированным затвором, между металлическим затвором и каналом расположен слой диэлектрика (МДП-транзисторы);
- с управляющим переходом металл-полупроводник (с диодом Шоттки), металлический электрод затвора образует выпрямляющий контакт с каналом, на который в рабочем режиме подается обратное напряжение;
- с управляющим  $p$ - $n$ -переходом, в качестве затвора используют слой полупроводника, образующий с каналом  $p$ - $n$ -переход, в рабочем режиме имеющий обратное включение.

Полевые транзисторы по типу проводимости канала подразделяют на транзисторы с каналом  $n$ - или  $p$ -типа.

Если канал  $n$ -типа, то рабочими носителями являются электроны, и на сток подается положительный потенциал. В случае канала  $p$ -типа рабочими носителями являются дырки, и на сток подается отрицательный потенциал.

В полевых транзисторах используется движение носителей заряда одного знака, которые под действием электрического поля, созданного вдоль канала, перемещаются от истока к стоку.

Характерной особенностью полевых транзисторов является малый ток затвора. Входное сопротивление полевых транзисторов на постоянном токе составляет  $10^8 \dots 10^{10}$  Ом. Поэтому полевые транзисторы являются приборами, управляемыми с помощью напряжения, в отличие от биполярных транзисторов, которые управляются с помощью тока.

Характерные признаки МДП-транзистора как объекта наноэлектроники:

- толщины подзатворных диэлектриков от единиц нанометров до 100 нм;
- длина канала от 20 нанометров до единиц микрометров;
- квантование электронного газа в инверсионном слое;
- механизмы переноса заряда через наноразмерные диэлектрические слои: сильнополевая туннельная инжекция по Фаулеру — Нордгейму (туннелирование носителей через треугольные потенциальные барьеры толщиной от единиц до десятков нанометров) и прямое туннелирование через диэлектрические слои толщиной менее 4 нм;
- интерференционные явления при переносе электронов через диэлектрические пленки наноразмерной толщины.

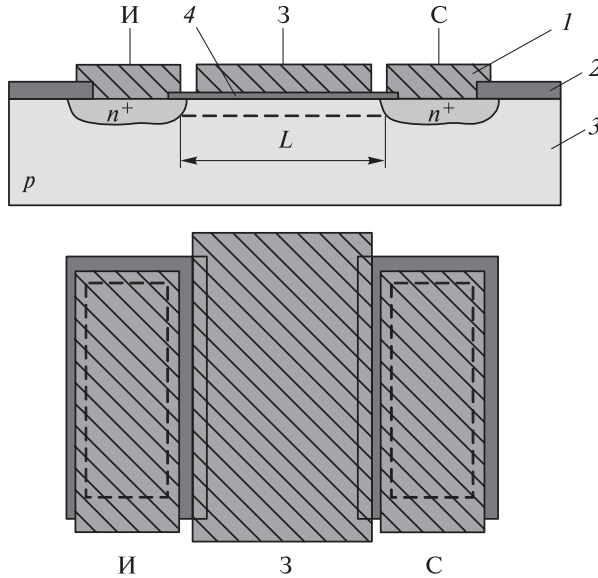
**Полевые транзисторы с изолированным затвором.** Структура МДП-транзистора с индуцированным каналом *n*-типа показана на рис. 1.60. В подложке *p*-типа с невысокой концентрацией акцепторов ( $10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) методами диффузии или ионного легирования сформированы сильно легированные истоковая и стоковая области с концентрацией примеси  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

Расстояние между стоковой и истоковой областями называется длиной канала  $L$  и составляет от десятков нанометров до нескольких микрометров. На поверхности полупроводника создается тонкий слой подзатворного диэлектрика толщиной 10...100 нм. В большинстве случаев это термически выращенный диоксид кремния. Металлические слои образуют выводы стока, истока и затвора.

**Работа транзистора.** Предположим, что заряд в диэлектрике равен нулю. Тогда при равенстве нулю напряжения между затвором и истоком ( $U_{зи} = 0$ ) проводящий канал в полупроводнике *p*-типа будет отсутствовать и между стоком и истоком оказываются два встречно включенных *p-n*-перехода. Поэтому при подаче напряжения на сток ток, протекающий через транзистор, будет ничтожно мал.

При подаче на затвор отрицательного напряжения ( $U_{зи} < 0$ ) поверхностный слой обогащается дырками, а ток, протекающий через транзистор, остается ничтожно малым. Транзистор закрыт. При подаче на затвор возрастающего положительного потенциала в подложке сначала образуется слой, обедненный дырками, а затем инверсионный слой электронов, образующий проводящий канал. Через транзистор начинает протекать ток, зависящий от напряжения на затворе.

Каналы, образующиеся под действием внешнего напряжения и отсутствующие в равновесном состоянии, называются индуцированными. Толщи-



**Рис. 1.60.** Структура МДП-транзистора:

1 — металлизация; 2 — толстый оксид; 3 — кристалл кремния; 4 — подзатворный диэлектрик; И — исток; 3 — затвор; С — сток

на индуцированного канала составляет 1...2 нм и практически не изменяется. Модуляция проводимости канала осуществляется за счет изменения концентрации носителей. Напряжение на затворе, при котором образуется проводящий канал, называется пороговым напряжением.

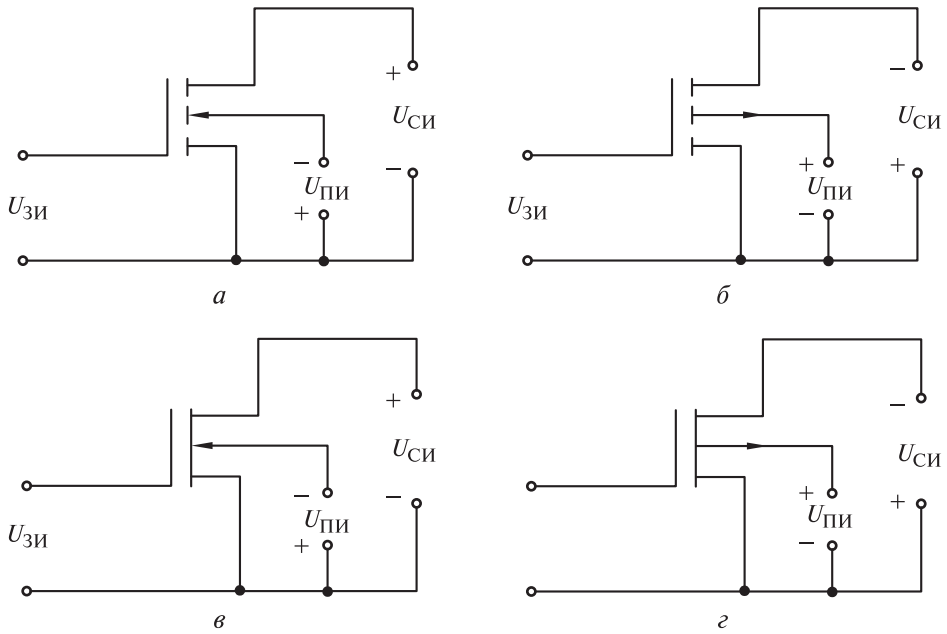
Если поверхностный слой полупроводника между стоком и истоком легировать донорами, то проводящий канал будет существовать и при нулевом напряжении на затворе. Пороговое напряжение при этом будет отрицательным. Такие транзисторы называются МДП-транзисторами со встроенным каналом.

Обозначения МДП-транзисторов и полярности рабочих напряжений для включения по схеме с общим истоком показаны на рис. 1.61.

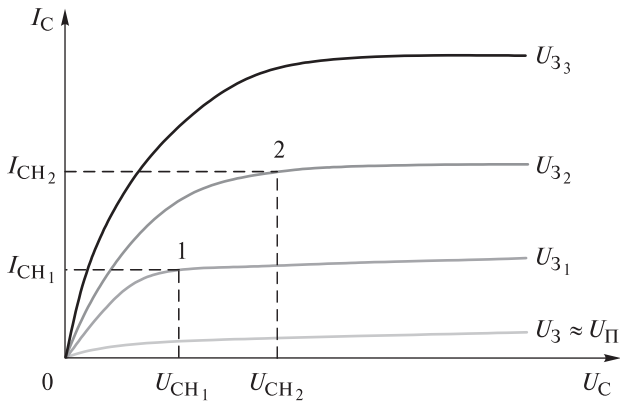
В МДП-транзисторах с  $p$ -каналом области истока и стока  $p^+$ -типа формируются в подложке  $n$ -типа. Если МДП-транзистор выполнен со встроенным каналом, то он работает как при положительном, так и при отрицательном напряжении на затворе, тогда как МДП-транзистор с индуцированным каналом работает только при одной полярности напряжения на затворе.

**Статические ВАХ МДП-транзисторов.** Выходные характеристики МДП-транзисторов показаны на рис. 1.62. На выходные ВАХ существенное влияние оказывают изменения в структуре канала, возникающие с ростом напряжения на стоке.

При  $U_{И} = U_{С} = 0$  электрическое поле в диэлектрике и полупроводнике будет однородным, и толщина канала будет одинаковой от истока до стока.



**Рис. 1.61.** Схемы МДП-транзисторов с индуцированным  $n$ -каналом ( $a$ ), с индуцированным  $p$ -каналом ( $б$ ), со встроенным  $n$ -каналом ( $в$ ), со встроенным  $p$ -каналом ( $г$ ) ( $U_{ПИ}$  — напряжение между подложкой и истоком)



**Рис. 1.62.** Зависимость тока стока от напряжения сток–исток при различных напряжениях на затворе ( $U_{З3} > U_{З2} > U_{З1} > U_{З} > U_{П}$ ; точки 1 и 2 соответствуют переходу транзистора в режим насыщения)



Если напряжение  $U_{СИ} > 0$  и невелико, то канал ведет себя как обычное сопротивление. Ток стока увеличивается пропорционально напряжению стока. Эту область ВАХ называют линейной областью работы транзистора.

С ростом напряжения  $U_{СИ}$  будут увеличиваться ток стока и потенциал поверхности полупроводника в направлении от истока к стоку. Вследствие этого разность потенциалов между затвором и поверхностью полупроводника будет уменьшаться в направлении стока. Соответственно сечение канала начинает сужаться в направлении стока. При напряжении на стоке, равном напряжению насыщения  $U_{СН}$ , разность потенциалов между затвором и поверхностью полупроводника будет равна нулю у стока. Толщина канала у стока становится равной нулю, МДП-транзистор переходит в режим отсечки канала. При напряжении  $U_{СИ} > U_{СН}$  точка отсечки сдвигается к истоку и происходит укорочение канала на  $\Delta L$  (рис. 1.63). На участке  $\Delta L$  обедненный слой выходит на поверхность полупроводника.

После отсечки канала ток стока не будет зависеть от потенциала стока. Эта область ВАХ называется областью насыщения тока стока.

На острие канала, в точке его перекрытия, концентрируется электрическое поле, напряженность которого становится выше критической  $\mathcal{E}_{кр}$ , и наступает режим насыщения скорости дрейфа электронов ( $v_D = \mu_n \mathcal{E}_{кр} = \text{const}$ ), инжектированных из острия канала в обедненный слой, следовательно, плотность тока  $j_n = e\mu_n n \mathcal{E}_{кр} = \text{const}$ , где  $e$  — заряд электрона  $\mu_n$ ,  $n$  — подвижность и концентрация электронов.

Основные параметры МДП-транзисторов

1. *Удельная емкость затвор–полупроводник* — определяет степень модуляции проводимости канала:

$$C_0 = \frac{\epsilon_d \mathcal{E}_0}{d},$$

где  $\epsilon_d$ ,  $d$  — относительная диэлектрическая проницаемость и диэлектрическая толщина подзатворного диэлектрика.

2. *Пороговое напряжение* (напряжение затвор–исток, при котором возникает проводящий канал в транзисторе):

$$U_{п} = U_{п.з} + U_0,$$

где  $U_{п.з}$  — напряжение плоских зон;  $U_0$  — напряжение изгиба зон.

3. *Крутизна сток–затворной характеристики* (чем больше  $S$ , тем чувствительнее реакция транзистора на изменение напряжения на затворе):

$$S = \left. \frac{dI_C}{dU_{3И}} \right|_{U_{СИ}=\text{const}}.$$

4. *Внутреннее (выходное) сопротивление* (сопротивление канала для переменного тока при постоянном напряжении затвор–исток):

$$R_C = \left. \frac{dU_{СИ}}{dI_C} \right|_{U_{ЗИ}=\text{const}}.$$

5. Коэффициент усиления (отношение изменения напряжения исток–сток к изменению напряжения затвор–исток при постоянном токе стока):

$$K = \left. \frac{dU_{СИ}}{dU_{ЗИ}} \right|_{I_C=\text{const}};$$

$$K = SR_C.$$

Обычно  $K = 50 \dots 200$ .

### 1.15.5. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ С УПРАВЛЯЮЩИМ $p$ – $n$ -ПЕРЕХОДОМ

Структура такого транзистора приведена на рис. 1.64. На подложке  $p$ -типа формируется эпитаксиальный  $n$ -слой, в котором методами диффузии создаются области истока, стока  $n^+$ -типа и затвора  $p^+$ -типа. Управляющий  $p$ – $n$ -переход образуют области  $p^+$  и  $n$ . Токпроводящим каналом является эпитаксиальный слой  $n$ -типа, расположенный между затвором и подложкой. При работе транзистора управляющий  $p$ – $n$ -переход должен быть включен в обратном направлении.

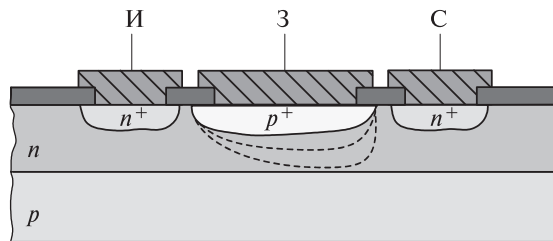


Рис. 1.64. Структура полевого транзистора с управляющим переходом

Глубина обедненного слоя управляющего  $p$ – $n$ -перехода тем больше, чем больше обратное напряжение на затворе. Толщина канала будет также соответственно меньше. Следовательно, с изменением обратного напряжения будет изменяться поперечное сечение канала, а следовательно, и его сопротивление. При наличии напряжения между стоком и истоком, изменяя обратное напряжение на затворе, можно управлять выходным током транзистора.

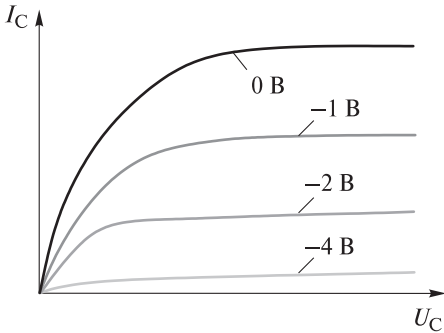
Входным током транзистора является обратный ток  $p$ – $n$ -перехода, составляющий для кремниевых приборов  $10^{-9} \dots 10^{-11}$  А.

На сток транзистора подается положительное напряжение,  $p$ – $n$ -переход между эпитаксиальным  $n$ -слоем и подложкой включается в обратном направлении, поэтому к подложке прикладывается отрицательное относительно

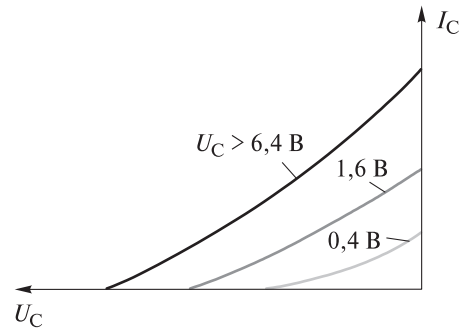
истока напряжение. Иногда подложка используется в качестве второго затвора. В некоторых транзисторах подложка соединяется с затвором и не имеет отдельного вывода.

Статические выходные и проходные характеристики полевых транзисторов с управляющим  $p-n$ -переходом показаны на рис. 1.65 и 1.66.

Выходные характеристики имеют участок насыщения тока, связанный, как и у МДП-транзисторов, с образованием «горловины» канала вблизи стока.



**Рис. 1.65.** Выходные ВАХ полевого транзистора с управляющим переходом

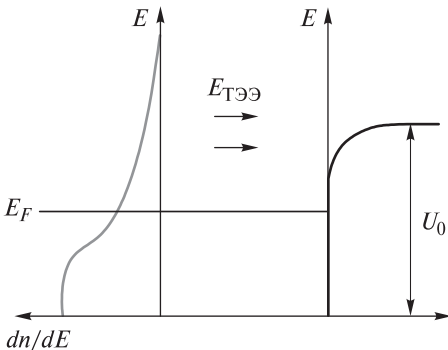


**Рис. 1.66.** Проходные ВАХ полевого транзистора с управляющим переходом

Напряжением отсечки полевого транзистора с управляющим  $p-n$ -переходом называется напряжение на затворе, при котором практически полностью перекрывается канал, и ток стока стремится к нулю.

### 1.15.6. МЕХАНИЗМЫ ПЕРЕНОСА ЗАРЯДА ЧЕРЕЗ ТОНКИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЛЕНКИ

Основными механизмами переноса заряда, определяющими проводимость изолирующих пленок, являются: термополевая эмиссия Шоттки, эмиссия Пула – Френкеля и сильнополевая туннельная инжекция по Фаулеру – Нордгейму.



**Рис. 1.67.** Термоэлектронная эмиссия

**Термополевая эмиссия по Шоттки.** Термоэлектронная эмиссия электронов объясняется наличием высокоэнергетического «хвоста» в распределении электронов по энергии. Термоэлектронной эмиссией называется испускание электронов нагретым телом в вакууме (рис. 1.67).

При наложении внешнего электрического поля происходит понижение

потенциального барьера, разделяющего металл и диэлектрик. Это явление называется эффектом Шоттки.

Снижение потенциального барьера происходит в результате сложения потенциала внешнего поля  $U_\varepsilon = q\mathcal{E}_x$  с потенциалом  $U_0$  на границе металл–диэлектрик, определяемым силами зеркального изображения (рис. 1.68).

Термополевая эмиссия Шоттки представляет собой надбарьерную термоэлектронную эмиссию, облегченную за счет наложения внешнего электрического поля.

Эмиссия Шоттки является одним из основных механизмов переноса зарядов в системах металл–диэлектрик–металл и металл–полупроводник–металл.

Плотность тока эмиссии по Шоттки

$$j_{\text{Ш}} = AT^2 e^{-\frac{q\Phi_B}{kT}} \frac{q}{kT} e^{\frac{qU}{4\pi\epsilon\epsilon_0 d}},$$

где  $A = 12 \cdot 10^5 \text{ А}/(\text{см}^2 \cdot \text{град}^2)$  — постоянная Ричардсона;  $\Phi_B$  — высота потенциального барьера.

**Эмиссия Пула — Френкеля.** В диэлектрических слоях, содержащих большое количество структурных дефектов и примесей, имеется высокая концентрация ловушек, способных захватывать носители.

Сильное электрическое поле может вызвать активацию свободных носителей заряда внутри самой диэлектрической пленки (рис. 1.69). Эмиссия Пула — Френкеля — это ускоренный электрическим полем процесс термовозбуждения электронов с ловушек в зону проводимости диэлектрика.

Плотность тока эмиссии по Пулу — Френкелю равна:

$$j_\Phi = B\mathcal{E}e^{-\frac{q\Phi_B}{kT}} \frac{2q}{kT} \sqrt{\frac{qU}{4\pi\epsilon\epsilon_0 d}},$$

где  $B$  — коэффициент пропорциональности;  $\Phi_B$  — глубина ловушки.

Зависимости плотностей токов эмиссий по Шоттки и Пулу — Френкелю спрямляются в координатах  $\lg j = f\sqrt{U}$ .

Токи эмиссий Шоттки и Пула — Френкеля в значительной степени зависят от температуры.

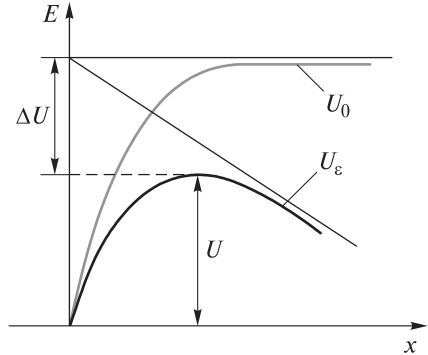


Рис. 1.68. Термополевая эмиссия

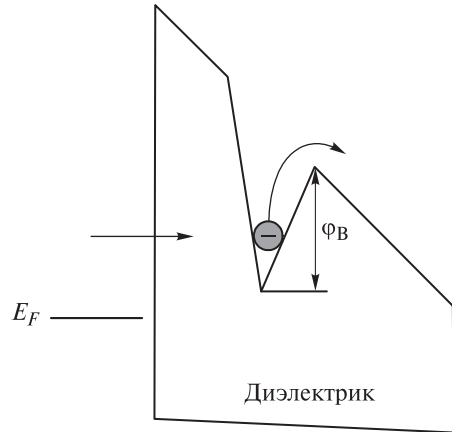


Рис. 1.69. Эмиссия Пула — Френкеля через тонкие диэлектрические пленки

## Тесты к лекции 1.15

### 1. Что такое МДП-структура?

- а) структура, состоящая из металла, диэлектрика и полупроводника;
- б) структура, состоящая из металла, диполя и подложки;
- в) структура, состоящая из металла, донорной примеси и полупроводника.

### 2. Что называется эффектом поля?

- а) явление изменения поверхностной проводимости под действием поперечного поля;
- б) явление изменения относительной проводимости транзистора под действием продольного поля;
- в) явление изменения барьерной проводимости под действием поперечного магнитного потока.

### 3. Какое явление в полупроводнике называется инверсией?

- а) изменение типа проводимости полупроводника;
- б) появление инверсионных следов на поверхности полупроводника;
- в) инверсионное повреждение  $p-n$ -перехода.

### 4. Какие три электрода содержат полевые транзисторы?

- а) исток, сток и затвор;
- б) эмиттер, база, коллектор;
- в) эмиттер, сток, коллектор.

### 5. Какие типы проводимости каналов бывают у полевых транзисторов?

- а) тип проводимости  $n$ - или  $p$ -типа;
- б) с дискретным и непрерывным типом проводимости;
- в) с фотонным и инверсионным типом проводимости.

### 6. Какие каналы в полевых транзисторах называются индуцированными?

- а) каналы, образующиеся под действием внешнего напряжения;
- б) каналы, образующиеся при отключении внешнего напряжения;
- в) каналы, образующиеся вследствие туннельного эффекта.

### 7. Какое напряжение называется напряжением отсечки в полевом транзисторе с управляющим $p-n$ -переходом?

- а) напряжение на затворе, при котором практически полностью перекрывается канал, и ток стока стремится к нулю;
- б) напряжение на затворе, при котором практически полностью открывается канал, и ток стока стремится к насыщению;
- в) напряжение между истоком и стоком, при котором практически полностью открывается канал, и ток стока стремится к нулю.

### 8. Что такое термоэлектронная эмиссия?

- а) испускание электронов нагретым телом в вакууме;
- б) испускание ионов нагретым телом в вакууме;
- в) испускание атомов нагретым телом в вакууме.

### 9. Что такое термополевая эмиссия Шоттки?

- а) надбарьерная термоэлектронная эмиссия, облегченная за счет наложения внешнего электрического поля;

- б) эмиссия, образованная за счет эффекта Шоттки — Пула;
- в) эмиссия электронов за счет воздействия магнитного поля.

**10. Что такое эмиссия Пула — Френкеля?**

- а) ускоренный электрическим полем процесс термовозбуждения электронов с ловушек в зону проводимости диэлектрика;
- б) ускоренный электрическим полем процесс перехода электронов из зоны проводимости на ловушки в диэлектрике;
- в) ускоренный электрическим полем процесс перехода электронов через  $p$ – $n$ -переход.