

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Диод Шоттки — это полупроводниковый прибор, свойства которого обусловлены выпрямляющим электрический ток переходом (контактом) металл/полупроводник.

По сравнению с *pn*-переходом, сформированном в полупроводниковом материале, контакт металл/полупроводник обладает (при прочих равных условиях) следующими характерными особенностями:

1) отсутствует инжекция и накопление неосновных носителей заряда в базовой области (в полупроводнике);

2) меньше величина прямого падения напряжения;

3) теплоотвод от выпрямляющего ток контакта металл/полупроводник лучше, чем у *pn*-перехода (при нормальных условиях теплопроводность поликристаллических Al, Pd и Mo больше теплопроводности кристаллического кремния);

4) выпрямляющие свойства сохраняются при больших частотах и плотностях электрического тока.

*Цель лабораторной работы — изучить физику контакта металл/полупроводник, освоить метод вольт-фарадных характеристик и определить основные параметры диодов Шоттки.*

## 2. КОНТАКТНАЯ РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ МЕТАЛЛОВ

Энергетическая диаграмма (зависимость одноэлектронной энергии  $E$  от координаты  $x$ ) разделенных вакуумом двух металлов при температуре  $T \rightarrow 0$  приведена на рис. 1а. До соприкосновения оба металла не заряжены, электрического поля между ними нет. Если энергия покоящегося электрона в вакууме (уровень вакуума) —  $E_0$ , а  $E_{c1}$  и  $E_{c2}$  — энергии дна зоны проводимости, то  $\chi_1 = E_0 - E_{c1}$  и  $\chi_2 = E_0 - E_{c1}$  — электронное сродство (глубина потенциальных ям) для первого и второго металла соответственно. Уровни Ферми  $E_F$  в каждом из металлов:  $E_{F1} = \zeta_1$  и  $E_{F2} = \zeta_2$ . Термоэлектронные работы выхода в обоих металлах:  $W_1 = \chi_1 - E_{F1}$ ,  $W_2 = \chi_2 - E_{F2}$ . В проводниках электричества при конечной темпе-

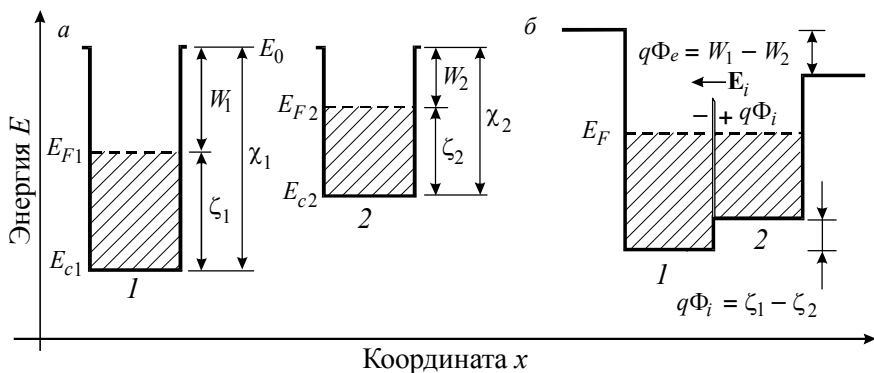


Рис. 1. Энергетическая зонная диаграмма: а — двух не контактирующих металлов; б — двух металлов в электрическом контакте после установления термодинамического равновесия

ратуре в  $s$ -зоне всегда имеются электроны, которые могут покинуть металл (и вернуться в металл); чем меньше работа выхода  $W$  и выше температура, тем больше число таких электронов.

При электрическом контакте металлов (рис. 1б) потенциальный барьер для электронов, обусловленный вакуумным промежутком, исчезает и электроны вследствие теплового движения могут переходить из одного металла в другой. Если  $W_1 > W_2$ , то при контакте из проводника 2 в проводник 1 переходит больше электронов, чем в обратном направлении, и проводник 2 заряжается положительно, а 1 — отрицательно. Поэтому в приграничном слое проводников (и во внешнем пространстве между ними) появляется электрическое поле. Через некоторое время после установления контакта металлов наступает равновесие, возникает электрическое поле  $E_j$ , которое уравнивает диффузионные потоки электронов. При этом потенциальная энергия электронов в металле 1 повышается, а в металле 2 понижается. Когда уровни Ферми выравниваются, то края потенциальных ям уже не находятся на одинаковом уровне. Внешняя контактная разность потенциалов  $\Phi_e = (W_1 - W_2)/q$ , где  $q$  — модуль заряда электрона. Потенциальная энергия электронов внутри металла при переходе через область

контакта также испытывает скачок  $q\Phi_i = \zeta_1 - \zeta_2$ , где  $\Phi_i$  — внутренняя контактная разность потенциалов (потенциальный барьер);  $\zeta_1$  и  $\zeta_2$  — химический потенциал металлов 1 и 2 соответственно.

Внешнюю контактную разность потенциалов  $\Phi_e$  можно определять методом Кельвина (метод колеблющегося электрода). На рис. 2 схематически представлен принцип измерения контактной разности потенциалов между двумя *различными* металлическими пластинами в вакууме. После их соединения уровни Ферми выравниваются потоком электронов с пластины 2 на пластину 1; пластины заряжаются. Если к пластинам дополнительно не приложено напряжение, то разность потенциалов между ними равна внешней контактной разности потенциалов  $\Phi_e$ . Одну из пластин приводят в колебательное движение так, что расстояние  $d$  между пластинами периодически изменяется (см. рис. 2). При изменении  $d$  контактная разность потенциалов  $\Phi_e$  остается постоянной. Поэтому, согласно соотношению  $\Phi_e = Q/C$ , где  $C = \varepsilon_0 S/d$  — емкость плоского конденсатора,  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная,  $Q$  — заряд на пластине площадью  $S$ , в цепи должен возбуждаться переменный во времени ток, вызванный изменением  $Q$ . При этом на резисторе  $R_c$  появляется зависящая от времени разность потенциалов. Подавая через переменный резистор  $R_v$  на пластины внешнюю разность потенциалов, равную контактной, но обратную ей по знаку, ток в цепи (разность потенциалов на  $R_c$ ) можно свести к нулю. Измерение подаваемой разности потенциалов производится вольтметром.

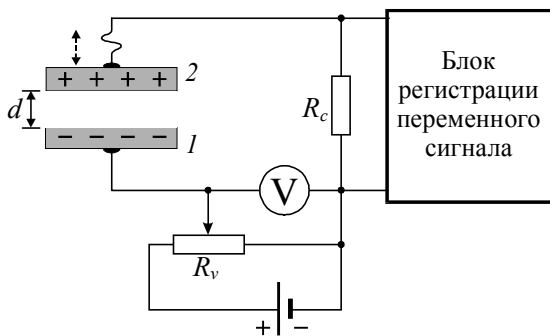


Рис. 2. Определение внешней контактной разности потенциалов между пластинами 1 и 2

Замечание 1. *Эффект Пельтье — выделение или поглощение теплоты при протекании электронов (дырок) через контакт двух различных материалов, подключенных к внешнему источнику тока. Количество теплоты Пельтье пропорционально плотности электрического тока. Эффект обусловлен тем, что электроны переносят не только заряд, но еще и свою энергию. Энергия электронов в металлах 1 и 2 отличается на величину, пропорциональную контактной разности потенциалов. Поэтому даже при одинаковой температуре проводников при возбуждении тока через контакт происходит перенос энергии. Если электроны под действием внешнего источника тока перемещаются против внутреннего электрического поля (на рис. 1 из металла 1 в металл 2), то тепло поглощается. При движении электронов по внутреннему электрическому полю (на рис. 1 из металла 2 в металл 1) тепло выделяется.*

### 3. КОНТАКТЫ МЕТАЛЛ/ПОЛУПРОВОДНИК

Если контакт металла и полупроводника идеален (т.е. какие-либо промежуточные слои и поверхностные состояния отсутствуют), то происходит диффузия электронов из материала с меньшей работой выхода в материал с большей работой выхода. В зависимости от соотношения работ выхода и типа электропроводности полупроводника возможны четыре типичных ситуации при контакте металла и полупроводника (рис. 3). Если работа выхода  $W_m$  электрона из металла больше работы выхода  $W_s$  из полупроводника, то электроны с большей вероятностью будут переходить из полупроводника в металл. Это приводит к образованию обедненного электронами (или же инверсного, если  $W_m \gg W_s$ ) приконтактного слоя в полупроводнике  $n$ -типа проводимости (рис. 3а). В полупроводнике  $p$ -типа проводимости образуется обогащенный дырками слой (рис. 3в). Если же соотношение работ выхода противоположное, то электроны переходят из металла в полупроводник. В результате в полупроводнике  $n$ -типа электропроводности образуется обогащенный электронами слой (рис. 3б), а в полупроводнике  $p$ -типа — обедненный дырками слой (рис. 3г).

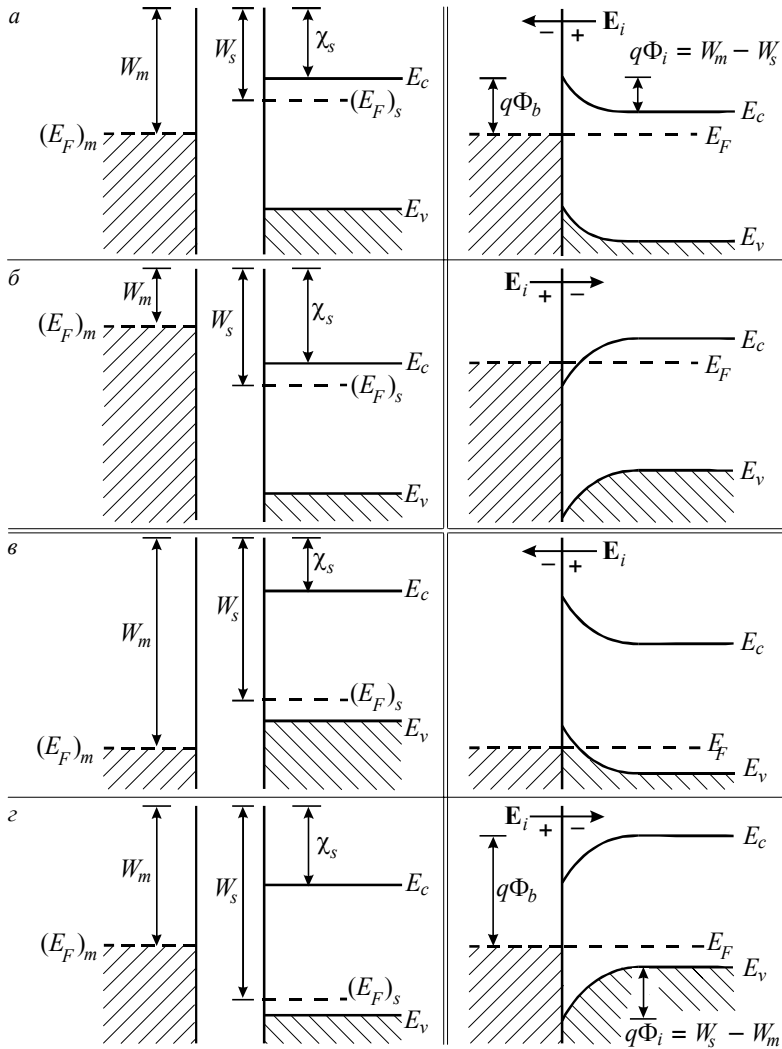


Рис. 3. Зонная диаграмма металла и полупроводника (слева — до электрического контакта, справа — после контакта и установления равновесия): а, б — для полупроводника n-типа электропроводности; в, з — для полупроводника p-типа; а, в — при  $W_m > W_s$ ; б, з — при  $W_m < W_s$ . Величина барьера для электронов металла:  $q\Phi_b = q\Phi_i + W_s - \chi_s = W_m - \chi_s$ ;  $q\Phi_i = |W_m - W_s|$  — высота энергетического потенциального барьера для основных носителей заряда полупроводника (изгиб зон)

Таким образом, пространственный заряд формируется при контакте металла с полупроводником любого типа электропроводности вне зависимости от соотношения работ выхода. Однако в обедненных слоях пространственный заряд состоит из ионизированных атомов примеси (доноров или же акцепторов), и сами слои из-за обеднения основными носителями заряда обладают большим по сравнению с остальным объемом полупроводника электрическим сопротивлением. При наличии обедненного (или инверсного) слоя контакт металл/полупроводник в общем случае обладает выпрямляющими свойствами (рис. 3а, з), так как внешнее напряжение, падая в основном на высокоомном переходе, будет изменять высоту потенциального барьера, изменяя тем самым условия прохождения носителей заряда через контакт.

Приконтактный слой, обогащенный основными носителями заряда, имеет малое сопротивление (по сравнению с остальным объемом полупроводника) и не обладает свойством выпрямлять переменный электрический ток (рис. 3б, в). Если ток и разность потенциалов от внешнего источника на контакте подчиняются закону Ома, то он называется омическим. Омические контакты в различных полупроводниковых приборах встречаются так же часто, как и выпрямляющие.

На рис. 4 показаны вольт-амперные характеристики (ВАХ) контактов. Контакт (рис. 4а) обладает выпрямляющими свойствами (ВАХ несимметрична и нелинейна). ВАХ на рис. 4б симметрична

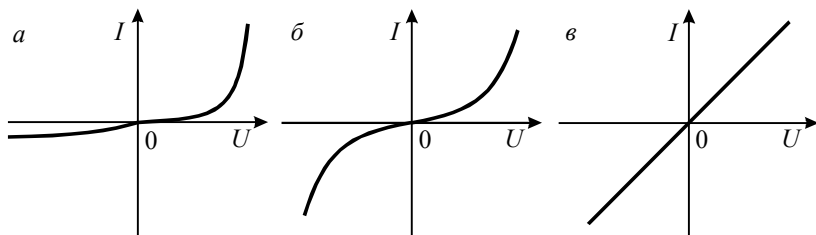


Рис. 4. Идеализированные зависимости тока  $I$  от разности потенциалов  $U$  на различных типах контактов (вольт-амперные характеристики).

Пояснения в тексте

на, следовательно, контакт не обладает выпрямляющими свойствами, однако его сопротивление зависит от приложенного напряжения (ВАХ нелинейна). Поэтому использование для электрического соединения полупроводниковых приборов контактов, ВАХ которых изображены на рис. 4а, б, нецелесообразно, так как они могут оказывать нежелательное воздействие на режим работы приборов. ВАХ омического контакта показана на рис. 4в.

Создание обогащенного основными носителями заряда поверхностного слоя в полупроводнике (рис. 3б, в) есть один из способов получения омических контактов. Альтернативой ему является использование для электрических контактов слоев сильнолегированных полупроводников (подлегирование контакта). В этом случае толщина образующегося слоя объемного заряда мала и будет иметь место туннельный перенос электронов из металла в полупроводник через энергетический барьер.

#### 4. БАРЬЕР ШОТТКИ

Рассмотрим физическую модель контакта металла и однородно легированного полупроводника  $n$ -типа, поверхности которых не содержат никаких посторонних фаз или поверхностных электронных состояний.

Пусть работа выхода полупроводника  $W_s$  меньше работы выхода металла  $W_m$  (рис. 3а). Сразу после соприкосновения поток электронов из полупроводника превышает поток электронов из металла. В результате металл в области контакта приобретает отрицательный заряд, а полупроводник — положительный. Возникшее между контактирующими образцами электрическое поле будет препятствовать переходу электронов из полупроводника в металл. Процесс обмена зарядами между металлом и полупроводником будет происходить до тех пор, пока уровни Ферми в системе не выровняются (см. рис. 3, 5) и установится равновесие, характеризующееся равенством токов термоэлектронной эмиссии. В результате у поверхности полупроводника энергетические зоны из-