

## ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПРЯМЫХ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНТАКТОВ МЕТАЛЛ-ПОЛУПРОВОДНИК

### И $p - n$ - ПЕРЕХОДОВ

**Цель работы:** ознакомиться с методами экспериментального измерения температурной зависимости прямых вольтамперных характеристик контактов металл-полупроводник и  $p-n$ -переходов, и научиться проводить такие измерения.

**Приборы и оборудование:** лабораторная установка для измерения прямых вольтамперных характеристик контактов, трубчатые нагреватели, автотрансформатор, термометр, полупроводниковые диоды ( $p-n$ -переход, контакт металл-полупроводник).

### МЕХАНИЗМЫ ПРОТЕКНИЯ ТОКА

#### В ВЫПРЯМЛЯЮЩИХ КОНТАКТАХ

Электрический ток в контакте металл-полупроводник и  $p-n$ -переходе возникает за счет переноса свободных или валентных электронов через все области контакта. Наибольшее препятствие движению электронов оказывает обедненная область, возникающая на границе раздела  $p$ - и  $n$  - полупроводников и на границе металл-полупроводник со стороны полупроводника. В этой области сосредоточено сильное контактное электрическое поле, которое и ограничивает число проходящих через контакт электронов. Свойства данной области и механизмы переноса электронов через нее и определяет вид прямых вольтамперных характеристик (ВАХ) контактов.

Существует три важнейших механизма переноса электронов через обедненную область контакта металл-полупроводник с барьером Шоттки. Для наиболее часто встречающегося случая контакта благородного металла с полупроводником  $n$ -типа, включенного в прямом направлении, они следующие:

- 1) переход электронов из зоны проводимости полупроводника через вершину потенциального барьера в металл (эмиссия через барьер);

- 2) рекомбинация и генерация электронов и дырок в обедненной области;
- 3) туннелирование электронов из полупроводника в металл.

На энергетической диаграмме контакта эти процессы схематически можно изобразить, так как это показано на рис. 1. Рассмотрим подробно каждый из указанных механизмов.

### 1. Эмиссия через барьер.

Основным отличительным признаком этого механизма является высокая начальная энергия электрона  $E$ , которую электрон тратит на преодоление контактного электрического поля внутри обедненной области. В зависимости от ширины  $\delta$  обедненной области по сравнению с длиной  $l$  среднего пробега электрона возможны два варианта данного механизма: термоэлектронная эмиссия и диффузия. При сравнительно малых  $\delta$  электроны как бы «проскакивают» обедненную область, растрачивая свою энергию только на преодоление отталкивающего электрического поля. В результате квазиуровень Ферми для электронов по всей обедненной области остается постоянным, а их концентрация на границе металл-полупроводник возрастает с приложенным прямым напряжением  $U$  по закону  $\exp(eU/kT)$ . Это термоэлектронный механизм переноса электронов. При больших  $\delta$  ( $\delta \gg l$ ), электроны внутри обедненной области успевают много раз столкнуться, прежде чем доберутся до границы раздела металл-полупроводник и перейдут в металл, и при этом их энергия растрачивается еще и на столкновения. За счет столкновений они также могут приобрести дополнительную энергию. В результате электроны двигаются в обедненной области полупроводника посредством диффузии в присутствии контактного электрического поля. Это диффузный механизм переноса электронов.

Анализ экспериментальных данных показал, что для полупроводников с высокой подвижностью, таких как кремний, арсенид галлия и другие, термоэлектронная теория лучше объясняет свойства контактов, чем диффузионная. Иными словами, в таких контактах величина тока ограничивается не движением электронов через обедненную область к границе, а эмиссией электронов в металл с этой

границы. В таком предположении ВАХ контакта металл-полупроводник имеет вид

$$i = i_0 \left[ \exp \left( \frac{eU}{kT} \right) - 1 \right], \quad (1)$$

где  $i_0$  - ток насыщения,  $k$  - постоянная Больцмана,  $e$  - заряд электрона,  $T$  - абсолютная температура. Величина  $i_0$  равна

$$i_0 = A^* \cdot T^2 \exp \left( - \frac{\Phi_B}{kT} \right). \quad (2)$$

Здесь  $A^*$  - эффективная постоянная Ричардсона,  $\Phi_B = eU_K$  - высота потенциального барьера на контакте (см. рис. 1).

Для обычных значений прямых напряжений  $U > 3kT/e$ , поэтому единицей в скобках уравнения (1) можно пренебречь и записать следующее выражение

$$i = i_0 \exp \left( \frac{eU}{kT} \right). \quad (3)$$

Эту зависимость на практике принимают за «идеальную». В реальных контактах за счет наличия других механизмов переноса электронов наблюдается отклонение от приведенной зависимости.

Температурная зависимость прямого тока в случае термоэлектронной эмиссии обусловлена, в основном, экспоненциальными членами в выражениях (1) и (2). В этом можно убедиться, прологарифмировав уравнение (3), предварительно заменив  $i_0$  выражением (2). Тогда

$$\ln i = \ln A^* + 2 \ln T + \frac{e}{kT} (U - U_K). \quad (4)$$

Поскольку  $\ln T$  представляет собой слабоизменяющуюся от  $T$  величину, то

$$\Delta \ln i = \frac{e}{k} (U - U_K) \Delta \left( \frac{1}{T} \right). \quad (5)$$

Следовательно, прямой ток при фиксированном прямом напряжении будет экспоненциально падать с ростом обратной температуры ( $1/T$ ). Измерив экспериментально температурную зависимость прямого тока можно построить график зависимости  $i(1/T)$  и определить величину потенциального барьера  $\Phi_B$  на контакте.

Если на контакте имеются отклонения от идеальности такие, как, например, тонкие промежуточные диэлектрические слои, поверхностные состояния, то прямая ВАХ такого контакта будет несколько отличаться от «идеальной» и будет иметь вид

$$i = i_0 \left[ \exp \left( \frac{eU}{\beta kT} \right) - 1 \right]. \quad (6)$$

Здесь введен параметр  $\beta$ , который называется коэффициентом неидеальности, и характеризующий отклонение зависимости от идеальной прямой ВАХ контакта. При этом, ток насыщения вычисляется по формуле:

$$i_0 = A * T^2 \exp \left( - \frac{\Phi_B}{\beta kT} \right). \quad (7)$$

## 2. Рекомбинация и генерация носителей в обедненной области

Рекомбинация носителей заряда при прямых смещениях и их генерация при обратных смещениях в обедненной области может играть большую роль при низких токах. При наличии рекомбинации прямые ВАХ контактов металл-полупроводник будут иметь вид:

$$i = i_0 \exp \left( \frac{eU}{kT} \right) + i_2 \exp \left( \frac{eU}{kT} \right), \quad (8)$$

где первый член представляет обычный ток термоэлектронной эмиссии, а второй член – ток рекомбинации, который равен

$$i_2 = \frac{en_i}{\tau} \delta S, \quad (9)$$

где  $n_i$  – собственная концентрация электронов, пропорциональная  $\exp(-E_g / 2kT)$ ,  $\delta$  - ширина области объемного заряда,  $S$  - площадь контакта,  $\tau$  - время жизни носителей заряда в обедненной области. В реальных контактах рекомбинация в обедненной области приводит к отклонению прямых ВАХ от идеальных: рост тока в прямом направлении происходит при этом медленнее с ростом напряжения, чем в случае чисто термоэлектронной эмиссии.

### 3. Туннелирование электронов сквозь обедненную область.

Всегда существует определенная вероятность части электронов с энергией ниже высоты потенциального барьера на контакте пройти «сквозь» барьер путем квантовомеханического туннелирования. Как известно, вероятность туннелирования быстро возрастает с уменьшением толщины барьера (обедненной области) и с ростом энергии электрона. Следовательно, в контактах на сильнолегированных полупроводниках, где ширина обедненной области мала, туннелирование электронов будет существенным механизмом переноса тока, причем наибольшую долю будут составлять высокоэнергетические электроны. Принято считать чисто туннельным механизмом перенос электронов из зоны проводимости полупроводника с уровня Ферми в металл без изменения их энергии. Если же из полупроводника туннелируют электроны с энергией выше уровня Ферми, то есть с частичным использованием термоэлектронной эмиссии, то такой процесс называют термополевой эмиссией. Термополевая эмиссия наблюдается при повышенных температурах, причем электроны полупроводника, проходящие таким путем в металл, имеют узкое энергетическое распределение около некоторой энергии, поскольку вероятность туннелирования экспоненциально возрастает с ростом энергии электронов, а число их экспоненциально убывает с ростом энергии.

Теория полевой и термополевой эмиссии в контактах металл-полупроводник является в настоящее время достаточно разработанной. Основные выводы теории следующие:

- 1) Полевая эмиссия наблюдается только для вырожденных полупроводников в определенном диапазоне температур и концентраций носителей.
- 2) Вольтамперная характеристика контакта при туннельном механизме может несколько различаться при различных условиях, например, при разных температурах и внешних смещениях.
  - а) Если положение уровня Ферми существенно ниже максимального уровня потенциального барьера и даны низкие температуры (случай полевой эмиссии), то ВАХ контакта в прямом направлении описывается следующим выражением:

$$i \sim \exp \left( \frac{eU}{E_{00}} \right), \text{ где } E_{00} = \frac{eh}{4\pi} \left( \frac{N}{\varepsilon_0 \varepsilon m^*} \right)^{1/2} = 18,5 \cdot 10^{-12} \left( \frac{N}{\varepsilon m^*} \right)^{1/2} \text{ эВ} \quad (10)$$

Здесь  $m^*$ ,  $\varepsilon$  - эффективная масса электронов и относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника, а  $N$  - концентрация доноров ( $\text{см}^{-3}$ ). При этом наклон кривых ВАХ, для данного случая, практически не зависит от температуры.

б) При достаточно высоких температурах наблюдается термополевая эмиссия и ВАХ контакта в прямом направлении описывается следующим выражением:

$$i \sim \exp \left( \frac{eU}{E_0} \right), \text{ где } E_0 = E_{00} \operatorname{cth} \left( \frac{E_{00}}{kT} \right) \quad (11)$$

Наклон кривых ВАХ в прямом направлении при этом уже будут несколько зависеть от изменения температуры.

Как было сказано выше, полевой и термополевой механизм переноса носителей через барьер наблюдается только в легированных материалах. Например, для контактов на основе полупроводников типа GaAs переход от термоэлектронной эмиссии к термополевому механизму переноса носителей через барьер соответствует концентрации доноров  $N > 10^{17} \text{ см}^{-3}$  при  $T = 300 \text{ К}$  и  $N > 10^{16} \text{ см}^{-3}$  при  $T = 77 \text{ К}$ . Для кремния эти концентрации примерно в 4 раза выше.

### Описание экспериментальной установки.

Для измерения прямых ВАХ выпрямляющих контактов используется лабораторная установка, собранная по схеме, изображенной на рис. 2. Постоянное напряжение от регулируемого источника питания типа УНИП – 5 (1) прикладывается к исследуемому контакту (5) через ограничительный магазин сопротивлений РЗЗ (2). Для измерения токов в схеме может использоваться любой стрелочный или цифровой прибор (3), который должен измерять токи в интервале от единиц микроампер до десятков миллиампер, а для измерения напряжения на диоде – цифровой вольтметр 4015 Tesla (4) с высоким входным сопротивлением или цифровой мультиметр. Для изменения температуры в лабораторной установке применяется блок трубчатых нагревателей (6), куда и устанавливается держатель с исследуемым контактом. Регулируемое напряжение к нагревателю подается через

автотрансформатор (7). Для измерения температуры в блок нагревателя устанавливается термометр.

Данная установка позволяет проводить измерения ВАХ контактов на постоянном токе с достаточной точностью. Точность измерения определяется, во-первых, точностью поддержания постоянного напряжения источником питания, во-вторых, точностью измерения тока и напряжения миллиамперметром и вольтметром, и в третьих, стабильностью характеристик самого измеряемого контакта.

В качестве измерителя тока можно применять миллиамперметр или микроамперметр любого типа, обеспечивающего необходимую точность измерений, например в интервале 0,1 – 0,5 %. Более высокая точность требуется при измерении напряжения на контакте. Дело в том, что в выпрямляющем контакте прямой ток экспоненциально зависит от приложенного напряжения (см. (1)). Незначительное изменение напряжения может привести к достаточно сильному изменению тока. Вследствие этого напряжение на контакте необходимо поддерживать и измерять со значительно более высокой точностью, чем ток.

### **ЗАДАНИЕ**

1. Ознакомиться с теорией переноса тока в выпрямляющих контактах.
2. Изучить электрическую схему установки для измерения прямых ВАХ контактов и порядок работы на ней.
3. Измерить прямые ВАХ контактов при различных температурах и определить их основные параметры.

### **ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.**

1. Собрать лабораторную установку согласно схеме, приведенной на рис. 2.
2. С помощью регулируемых декад магазина сопротивлений (2) установить значение сопротивления не менее 20 кОм.
3. Включить приборы и дать им прогреться в течении 5 – 10 минут.

4. При комнатной температуре измерить прямую ВАХ характеристику контакта по точкам, изменяя каждый раз ток  $I$  через контакт и регистрируя соответствующее ему напряжение  $U$ . Изменение тока можно осуществлять изменением сопротивления на магазине (2) с помощью регулируемых декад, или если необходимо изменением напряжения на источнике питания (1). Токи через контакт задавать согласно приведенной ниже таблице исходных данных (табл. 1).
5. Установить держатель с контактом в нагреватель. Согласно пункту 4, измерить ВАХ контакта при температуре  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а затем и при  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Температуру можно контролировать с помощью автотрансформатора, изменяя его выходное напряжение.
6. Для каждой температуры составляется таблица экспериментальных данных (табл. 1). Значения  $\Delta U$ ,  $\Delta \lg i$  соответствуют разности последующих и предыдущих значений данной величины.

Таблица исходных экспериментальных данных:

Табл. 1

Температура:										
$i$ , мкА	10	20	50	100	300	1000	2000	4000	7000	10000
$U$ , В										
$\Delta U$ , В										
$\lg i$										
$\Delta \lg i$										
$\beta$										
$\Phi_B$ , эВ										
$\Phi_B^*$ , эВ										

7. Построить на миллиметровой бумаге графики измеренных ВАХ в линейных координатах  $i(U)$ , и в полулогарифмических координатах  $\lg i(U)$ . Определить  $\lg i_0$ , путем экстраполяции прямой в координатах  $\lg i(U)$  на ось токов.
8. Из полученных значений  $\lg i_0$  оценить величину потенциального барьера  $\Phi_B$  на контакте, используя следующую формулу:



$$\Phi_B = 2,3 kT ( \lg A^* T^2 - \lg i_0 ).$$

9. Вычислить параметр неидеальности  $\beta$  для всех измеренных токов по формуле:

$$\beta = 0,43 \frac{e}{kT} \frac{\Delta U}{\Delta \lg i}$$

10. Определить значение исправленной высоты потенциального барьера  $\Phi_B^*$  на исследуемом контакте с учетом его неидеальности. Для этого величину  $\Phi_B$  умножить на среднее значение параметра неидеальности  $\beta$ , т.е.

$$\Phi_B^* = \beta_{cp} \Phi_B.$$

11. Повторить пункты 7 – 10 для каждой из измеренных температур.

12. Построить графики зависимостей  $\Phi_B(T)$ ,  $\Phi_B^*(T)$ ,  $\beta(T)$ .

Вычисленные значения  $kT$ ,  $\lg ( A^* T^2 )$ ,  $e / kT$  для различных температур приведены в таблице 2.

### Вопросы

1. Какова цель работы?
2. Какие механизмы протекания тока в контактах металл-полупроводник Вы знаете?
3. Опишите механизм термоэлектронной эмиссии через барьер на контакте металл-полупроводник.
4. Изложите рекомбинационный механизм переноса тока через контакт.
5. Каковы особенности вольтамперной характеристики при туннельном и термополевом механизмах переноса тока?
6. Расскажите устройство и принцип действия измерительной установки.
7. Каков порядок проведения измерений?
8. Как определяется параметр неидеальности контакта?
9. Какие экспериментальные таблицы и графики необходимо построить?

### Литература

1. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. М., 1973.
2. Стриха В.И., Бузанева Е.В., Радзиевский И.А. Полупроводниковые приборы с барьером Шоттки. М., 1974.

Таблица 2.

<i>Температура, К</i>	<i>kT, эВ</i>	<i>lg ( A* T<sup>2</sup> )</i>	<i>e / kT, Кл / эВ</i>
290	0,0250125	5,838609848	39,98001
295	0,02544375	5,853457884	39,30238271
300	0,025875	5,868056362	38,647343
305	0,02630625	5,882413531	38,01378
310	0,0267375	5,89653724	37,40065451
315	0,02716875	5,91043496	36,80699333
320	0,0276	5,924113809	36,23188406
325	0,02803125	5,937580574	35,67447046
330	0,0284625	5,950841732	35,13394818
335	0,02889375	5,963903466	34,60956089
340	0,029325	5,976771686	34,10059676
345	0,02975625	5,989452043	33,60638521
350	0,0301875	6,001949941	33,126294
355	0,03061875	6,014270558	32,65972647
360	0,03105	6,026418854	32,20611916
365	0,03148125	6,038399581	31,76493945
370	0,0319125	6,050217301	31,33568351
375	0,03234375	6,061876388	30,9178744
380	0,032775	6,073381046	30,51106026
385	0,03320625	6,084735311	30,11481272
390	0,0336375	6,095943066	29,72872538
395	0,03406875	6,107008044	29,3524124
400	0,0345	6,117933835	28,98550725

Если  $kT$  измерять в электронвольтах, то  $k = 8,6 \times 10^{-5} \text{ эВ} \cdot \text{К}^{-1}$ .

Постоянная Ричардсона  $A^* = 8,2 \text{ А} \times \text{К}^{-2} \times \text{см}^{-2}$ .

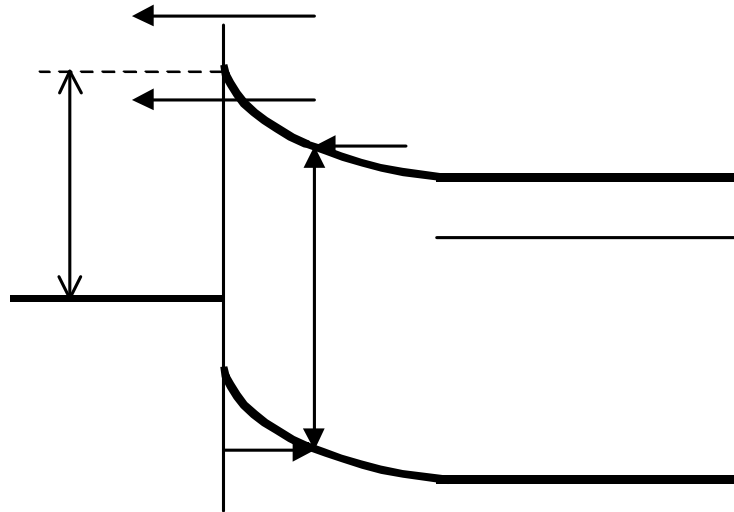


Рис. 1. Энергетическая диаграмма контакта металл – полупроводник при прямом смещении с указанием механизмов переноса тока.

$F_M, F_{\Pi}$  – уровни Ферми металла и полупроводника, соответственно.  
 $E_c, E_v$  – края разрешенных зон.  
 $\Phi_B$  – высота потенциального барьера.

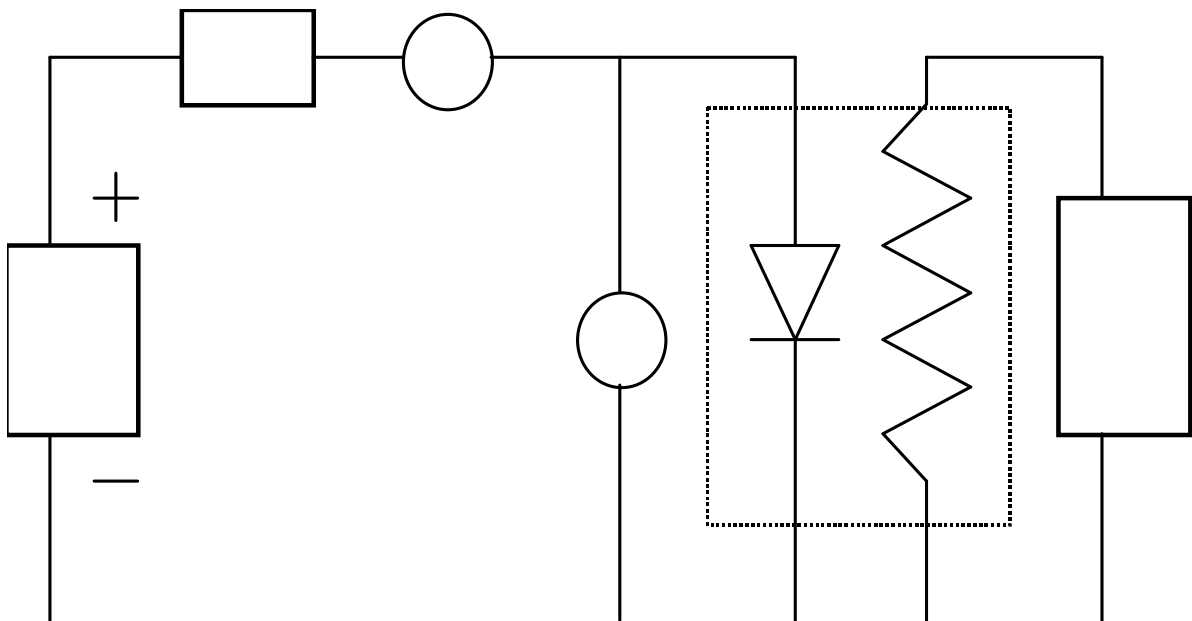


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки для измерения прямых вольт – амперных характеристик выпрямляющих контактов при различных температурах.