

*СПбНИУ ИТМО  
Кафедра Физики*

*Лабораторная работа №13  
«Исследование свойств электронно-дырчатого  
перехода в полупроводниках»*

*Выполнил  
Широков О.И  
гр.2120*

*Санкт-Петербург  
г.2013*

## 1. Теоретическая часть

Интересные явления наблюдаются в контактах металл-полупроводник и полупроводник-полупроводник. Наиболее важное свойство их состоит в выпрямительном действии, которое заключается в том, что сопротивление контакта зависит от направления тока.

Хотя детали процессов в контактах полупроводников с металлами несколько отличны от таковых в контактах двух полупроводников, основные причины выпрямительного действия в обоих случаях одинаковы. Поэтому мы ограничимся только разбором контакта двух полупроводников.

По характеру своей проводимости полупроводники могут быть электронными ( $n$ -тип) и дырочными ( $p$ -тип). В полупроводниках  $n$ -типа основными подвижными носителями заряда являются отрицательные электроны, а в полупроводниках  $p$ -типа – положительные дырки. В случае контакта двух полупроводников электроны и дырки получают возможность переходить из одного полупроводника в другой, и поэтому между полупроводниками, так же как и между металлами, возникает контактная разность потенциалов, а в тонком пограничном слое появляется контактное электрическое поле.

Если в контакте находятся два полупроводника одного и того же типа (оба электронные или дырочные), то оба полупроводника обмениваются одинаковыми частицами: либо электронами, либо дырками, и явления в этом случае имеют большое сходство с явлениями в двух соприкасающихся металлах. Поэтому мы остановимся только на том случае, когда один из полупроводников имеет электронную проводимость ( $n$ -тип), а другой – дырочную ( $p$ -тип).

Отметим, что такой контакт в чистом виде нельзя получить, прижимая друг к другу два полупроводника, так как вследствие шероховатости поверхности соприкосновение будет происходить лишь в немногих точках; между ними будут воздушные зазоры, в которых образуются пленки окислов, и контакт будет иметь сложное строение. Поэтому для получения  $p$ - $n$ -контакта обычно в пластинку чистого полупроводника (например, германия или кремния) вводят две примеси – одну донаторную (т.е. сообщающую электронам проводимость), а другую акцепторную (сообщающую дырочную проводимость), и распределяют их таким образом, чтобы в одном конце имелся избыток одной из примесей, а в другом конце – избыток другой. Тогда в одной половине пластинки возникает электронная проводимость, а в другой – дырочная, причем между обеими областями будет расположен тонкий переходный слой, в котором обе примеси компенсируют друг друга (электронно-дырочный переход, или  $p$ - $n$ -переход).

Рассмотрим сначала  $p$ - $n$ -контакт в отсутствии тока. Вследствие теплового движения электроны из  $n$ -области будут переходить в  $p$ -область (и там рекомбинировать с дырками), а дырки из  $p$ -области – в  $n$ -область (и рекомбинировать с электронами). Поэтому в  $n$ -области, вблизи границы раздела, появится положительный объемный заряд;  $n$ -область приобретет положительный потенциал и энергия электрона в ней станет меньше (так как заряд электрона отрицателен), а потенциал  $p$ -области сделается отрицательным и энергия электрона в ней увеличится. Кривая распределения потенциальной энергии электронов  $W_e$  будет иметь вид, показанный на рис. 1, а сплошной кривой. Напротив, энергия положительных дырок  $W_d$  будет больше в  $n$ -области и меньше в  $p$ -области (пунктирная кривая).

В состоянии равновесия полный ток через контакт равен нулю. Этот ток в отличие от металлов, где носителями заряда являются только электроны, складывается как из движения электронов, так и из движения дырок. Остановимся на этом вопросе подробнее.

Прежде всего, напомним, что в любом полупроводнике, помимо *основных* носителей заряда (представленных в большинстве), всегда имеется еще и некоторое количество *неосновных* носителей заряда. Поэтому в электронном полупроводнике наряду с электронами проводимости (основные носители заряда) имеется еще небольшое количество дырок (неосновные носители заряда), а в дырочном полупроводнике, кроме дырок, еще и некоторое количество электронов. Количество неосновных носителей обычно мало по сравнению с количеством основных.

На рис. 1 видно, что контактное поле *способствует* движению *неосновных* носителей, которые “скатываются” с потенциального уступа. Поэтому все неосновные носители, генерируемые в приконтактной области, движутся через  $p$ - $n$ -переход и образуют некоторый ток силы  $i_n$  направленный от  $n$  к  $p$ . Сила этого тока практически не зависит от разности потенциалов между  $n$ - и  $p$ -полупроводниками и определяется только количеством неосновных носителей, образующихся в приконтактной области в единицу времени.

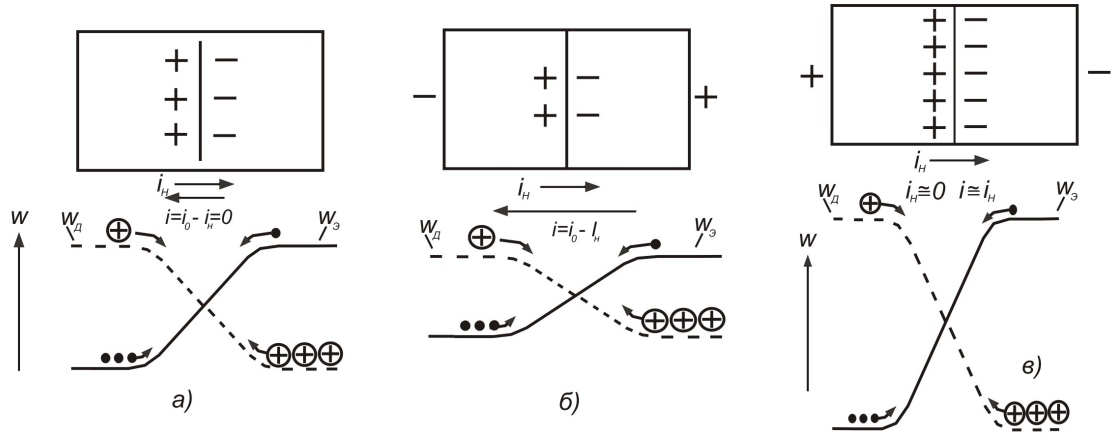


Рис. 1. Электрический ток в контакте двух полупроводников

Основные же носители (дырки, движущиеся справа налево, и электроны, движущиеся слева направо) образуют ток  $i_o$ , направленный противоположно, т.е. от  $p$  к  $n$ . Из рис. 1, а видно, что контактное поле препятствует движению основных носителей, которые должны преодолевать потенциальный барьер. В состоянии равновесия устанавливается такая высота потенциально барьера (контактная разность), при которой полный ток

$$i = i_o - i_n = 0.$$

Посмотрим теперь, что будет происходить при наличии тока через контакт. Предположим, что мы приложили к контакту напряжение такого знака, что на  $n$ -области имеется отрицательный потенциал и на  $p$ -области – положительный (рис. 1, б). Тогда энергия электронов в  $n$ -области увеличится, а в  $p$ -области уменьшится, а следовательно высота потенциального барьера станет *меньше*. При этом ток неосновных носителей  $i_n$ , как говорилось выше, не изменится. Ток же основных носителей  $i_o$  увеличится, так как теперь большое количество электронов сможет преодолеть потенциальный барьер и перейти слева направо и большее количество дырок – перейти в противоположном направлении. В результате через контакт будет идти ток  $i = i_o - i_n$ , направленный от  $p$  к  $n$ ; сила тока будет быстро нарастать с увеличением приложенного напряжения.

Иное будет происходить, если к  $n$ -области присоединен положительный полюс источника тока, а к  $p$ -области – отрицательный (рис. 1, в). В этом случае высота потенциального барьера *увеличится* и ток основных носителей  $i_o$  уменьшится. Уже при напряжениях порядка 1 в этот ток практически будет равен нулю, и поэтому через контакт будет течь только ток неосновных носителей  $i_n$ , величина которого весьма мала.

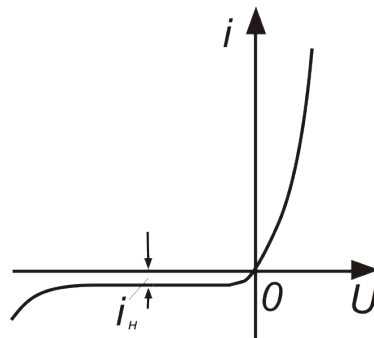


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика контакта двух полупроводников

В силу изложенного зависимость тока от напряжения (вольтамперная характеристика) для контакта двух полупроводников (*p-n*-перехода) имеет вид, изображенный на рис. 2. Когда ток направлен от *p*- к *n*-области, сила тока велика и быстро увеличивается с напряжением, а следовательно, контакт для этого направления тока (*проходное* направление тока) имеет малое сопротивление. Если же ток направлен от *n*- к *p*-области, сила тока весьма мала и почти не зависит от напряжения. Для этого направления тока (*запорное* направление) контакт имеет большое сопротивление. Таким образом, контакт двух полупроводников обладает *односторонней* проводимостью или вентильным свойством и имеет вследствие этого *нелинейную вольт-амперную характеристику*. При включении в цепь переменного тока такие контакты действуют как выпрямители.

Аналогичные явления действуют при контактах полупроводников с металлами, которые также обладают односторонней проводимостью и нелинейной характеристикой.

Когда приложенное обратное напряжение становится достаточно большим, в контакте происходит ряд дополнительных явлений, вызванных разогреванием контакта и действием сильного электрического поля, сосредоточенного в переходе. Это приводит к быстрому увеличению обратных токов, которые разрушают выпрямляющий переход (“пробой”).

Из сказанного следует, что электрический ток в контактах принципиально не отличается от электронной эмиссии. Различие заключается в том, что при обычной эмиссии электроны выходят из металла в вакуум, в случае же контактов электроны (и дырки) переходят из одного проводника в другой. Так как внутренняя контактная разность потенциалов значительно меньше (для двух полупроводников – десятые доли вольта), чем работа выхода из металлов (несколько вольт), то сильная эмиссия наблюдается уже при комнатных температурах. Прикладывая к контакту разность потенциалов, мы изменяем работу выхода (высоту потенциального барьера) и этим управляем силой тока электронной эмиссии.

#### *Объяснение*

*выпрямляющего действия в контактах было дано впервые Б.И. Давыдовым и, независимо, Шоттки и Мотом и получило дальнейшее развитие в много численных экспериментах и теоретических исследованиях советских и зарубежных физиков.*

#### *Обработка результатов измерений*

##### *Коэффициенты выпрямления*

##### *1) Комнатная температура*

###### *Купруксный диод*

U, В	K=J+/J-, ед
0.1	0.2
0.2	0.2155
0.3	0.2044
0.4	0.2067

###### *Селеновый диод*

U, В	K=J+/J-, ед
0.1	1
0.3	0.6470
0.5	0.8405
0.7	0.9729

#### *Нагревание*

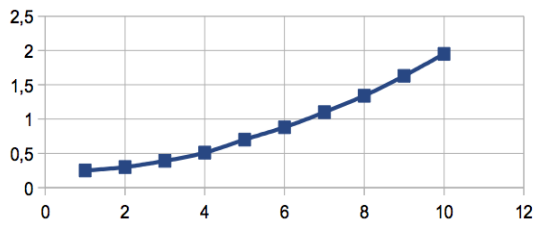
##### *Купруксный диод*

U, В	K=J+/J-, ед
0.1	0.2
0.2	0.2125
0.3	0.2045
0.4	0.2067

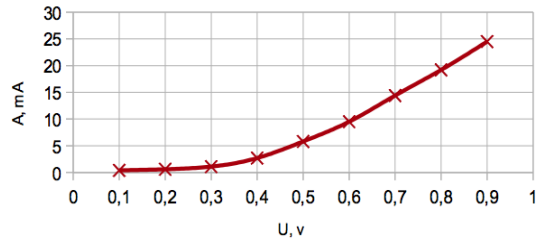
##### *Селеновый диод*

U, В	K=J+/J-, ед
0.1	3.5
0.2	2.63
0.3	2.59
0.4	2.48

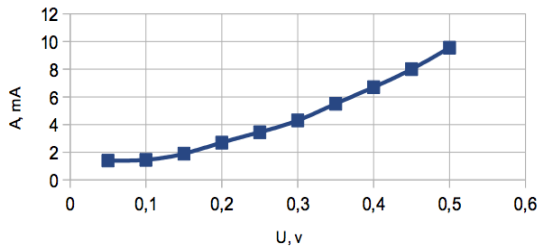
— Прямой ток, комнатная температура купруксный диод, предел измерений 2мА



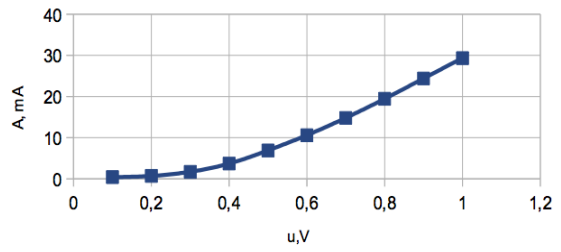
— Селеновый диод, предел 200мА



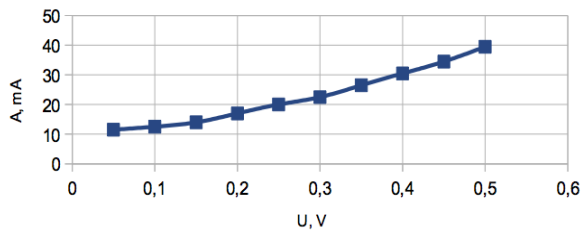
— Обратный ток купруксный диод, предел измерений 500мА



— Селеновый диод, предел 50 мА



— Нагревание Прямой ток купруксный диод, предел измерений 2мА



— Селеновый диод, предел 200мА

