

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОГО ПЕРЕХОДА

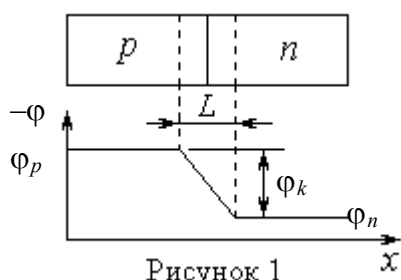


Рисунок 1

Современная теория электронно-дырочного перехода (*p-n*-перехода) базируется на том, что на его ширине L (рис. 1) действует только одна единственная разность потенциалов, *контактная разность потенциалов* φ_k , и каких-либо других потенциалов здесь нет. Поэтому φ_k возникает только за счёт диффузии электронов и дырок из-за различия их концентраций в *p*- и *n*-полупроводниках. В [1] особо подчёркивается, что при этом каких-либо электрических взаимодействий нет. В результате диффузионного перемещения электронов и дырок возникает контактная разность потенциалов $\varphi_k = \varphi_p - \varphi_n$, которая

прекращает диффузию [2]. Эти фундаментальные положения порождают ряд вопросов, на которые нет ответов.

Вопрос 1. Если причиной диффузии является только различие концентраций электронов и дырок без каких-либо электрических воздействий, то почему диффузию прекращает контактная разность потенциалов φ_k , т.е. именно электрическое воздействие, хотя различие концентраций электронов и дырок сохраняется, и почему при прочих равных условиях в германиевых *p-n*-переходах диффузия прекращается при $\varphi_k = 0,35$ В, а в кремниевых – при $\varphi_k = 0,7$ В. Из этих чисел видно, что φ_k в определенной степени является мерилем диффузии.

Следовательно, если только различие концентраций электронов и дырок не является достаточным условием для их диффузии, то не исключено, что её начало порождает аналогичное электрическое воздействие. А именно: в начале формирования *p-n*-перехода электроны переходят из *n*-полупроводника в *p*-слой и дырки – навстречу не диффузионно, а под действием какого-то неизвестного до сих пор электрического ускоряющего поля. Именно поиску этого поля посвящена данная работа.

Вопрос 2. Общеизвестно, что электроны, двигаясь в тормозящем электрическом поле, передают ему свою энергию [3], увеличивая напряжённость тормозящего поля.

Однако, при протекании прямого тока через *p-n*-переход, несмотря на явное наличие тормозящего поля для основных носителей заряда, напряжённость этого поля не увеличивается.

Спрашивается, куда девается энергия, которую электроны и дырки передают тормозящему полю *p-n*-перехода.

Ответа на этот вопрос нет из-за того, что в общеизвестной модели (рис. 1) отсутствуют какие-либо силы, заставляющие электроны и дырки не только преодолевать тормозящее поле, но и перемещаться вообще.

Поскольку должна сохраняться электрическая нейтральность, то её сохранение возможно только при том условии, что на ширине перехода L , кроме тормозящего поля, обязательно должно быть неизвестное на сегодня ещё и ускоряющее поле. Это ускоряющее поле и следует найти.

Вопрос 3. Подсчитаем баланс энергии в замкнутой цепи *p-n*-перехода при протекании прямого тока (рис. 2).

Под прямым напряжением $U_{пр} = 0,5$ В и $\varphi_k = 0,7$ В через кремниевый *p-n*-переход протекает значительный прямой ток.

Поскольку контакты металла с *p*- и *n*-полупроводниками K_p и K_n , образующими *p-n*-переход, являются омическими, т.е. «... не имеют униполярных свойств» [1, с. 241], то подвижные носители заряда могут обмениваться энергией только с полем источника $U_{пр}$ и полем *p-n*-перехода.

При этом каждый электрон в среднем передаёт тормозящему полю перехода энергию 0,7 эВ, а если потреблял бы её от источника $U_{пр} = 0,5$ В, то в количестве не более 0,5 эВ, т.е. переданная энергия больше потреблённой, что исключено.

Сомнительное потребление энергии очевидно, ибо в замкнутой цепи *p-n*-перехода под прямым напряжением (рис. 2) нет ни одного участка, где бы электроны ускорялись, т.е. потребляли бы энергию.

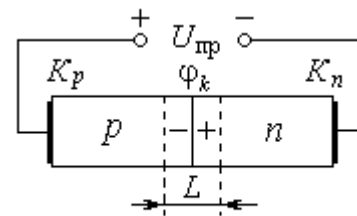


Рисунок 2

Действительно, двигаясь от $(-U_{np})$ к $(+U_{np})$ по часовой стрелке, электроны не обмениваются энергией с полями контактов K_n и K_p , т.к. контакты выполнены омическими, а на участках L и U_{np} – тормозятся, т.е. только передают энергию без её потребления.

Таким образом, в известной трактовке работы p - n -перехода электроны только передают энергию, не потребляя её, т.е. не являются переносчиками энергии от источника U_{np} .

Вопрос 4. Поскольку контакты металла с p - и n -полупроводниками, образующими p - n -переход, являются омическими, то в цепи p - n -перехода действует только контактная разность потенциалов Φ_k , из-за чего объём p - n не является электрически нейтральным (рис. 1), и тогда Φ_k должна измеряться непосредственно, например, вольтметром. Однако непосредственно измерить Φ_k не удаётся.

Это возможно только в двух случаях: либо Φ_k отсутствует (чего не может быть), либо наряду с ней есть неизвестная на сегодня разность потенциалов противоположной полярности, которую необходимо найти.

Вопрос 5. Общеизвестно [4], что вследствие образования p - n -перехода все энергетические уровни электронов, сколько бы их ни было на неограниченной длине x образца, смещаются на $e\Phi_k$ (рис. 3).

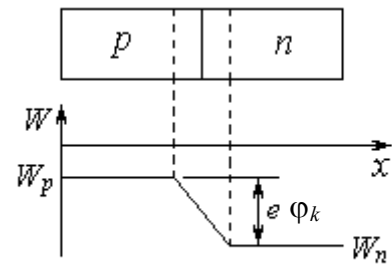


Рисунок 3

Спрашивается, откуда берётся или куда девается эта неограниченно большая энергия, если энергией, не больше $e\Phi_k = W_p - W_n$, обменивается с полем p - n -перехода лишь та часть электронов и дырок, которая покинула его ширину, т.е. ничтожно малое их число.

Не задерживаясь на других многочисленных парадоксах, отметим, что на наш взгляд, все упомянутые и другие противоречия обусловлены двумя изъянами теории p - n -перехода.

Во-первых, несмотря на широкую известность существования поверхностных уровней, обусловленных вытеснением электронов и дырок на поверхности из глубины полупроводников [5], действие этих уровней в поиске контактной разности потенциалов Φ_k никак не учитывается.

Во-вторых, в теории p - n -перехода бездоказательно утверждается, что в центре перехода напряжённость электрического поля одна и та же. При этом априори исключена возможность разрыва функции $\Phi_k(x)$ в центре p - n -перехода, тем более что зависимость концентраций примесей от x здесь претерпевает разрыв.

Учёт этих двух факторов приводит к следующим поправкам.

Поправка 1. Найдём все разности потенциалов, которые действуют на ширине p - n -перехода, начиная с его формирования.

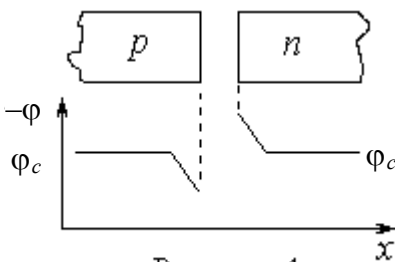


Рисунок 4

На поверхностях уединённых p - и n -полу-проводников есть поверхностные уровни, обусловленные вытеснением электронов и дырок на поверхности из глубины полупроводников, из-за чего потенциалы на поверхностях иные, нежели в глубине. Как говорят, потенциальные диаграммы уединённых полупроводников на их границах «изгибаются» [5] (рис. 4).

Здесь и далее: Φ_c – дно зоны проводимости.

При металлургическом контакте p - и n -полупроводников на их границе возникает ускоряющая разность потенциалов

(назовём её так) Φ_n , которая

ускоряет электроны и дырки в центре перехода [6].

Таким образом, электроны и дырки движутся через центр перехода не за счёт диффузии, а под ускоряющим полем, обусловленным поверхностными уровнями.

Электроны и дырки оставляют неподвижные заряженные ионы противоположной полярности, которые создают известную контактную разность потенциалов Φ_k .

Когда упомянутые разности потенциалов сравниваются ($\Phi_k = \Phi_n$), движение носителей через центр перехода прекращается, и распределение потенциалов на переходе принимает вид рис. 5.

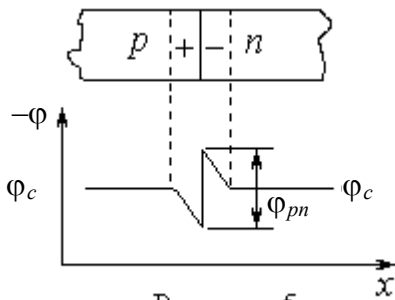


Рисунок 5

Из этой диаграммы видно, что изменение потенциала на одной полуширине перехода положительно (+), а на другой – отрицательно (-). Между этими изменениями разрыв, а во вне за их пределами потенциал Φ_c один и тот же. Поэтому p - n -переход в целом электрически нейтрален, из-за чего, в частности, невозможно измерить Φ_k .

Так исчезают **Вопросы 1, 2 и 4.**

Поправка 2. Электроны, покидая полуширину (-), накапливаются в потенциальной „яме” на полуширине (+), а дырки таким же образом „всплывают” на полуширине (-).

Поэтому переход обогащён (а не обеднён, как считается) подвижными носителями заряда, из-за чего имеет низкое (а не высокое) сопротивление. Тогда при включении прямого напряжения $U_{пр}$ (рис. 6) оно прикладывается не к переходу (как принято считать), а к слоям p и n , создавая на них ускоряющее поле соответственно для дырок и электронов, благодаря которому они могут преодолеть потенциальный барьер на ширине перехода. Тогда механизм образования прямого тока следующий.

При малом прямом напряжении $U_{пр} < \Phi_{pn}$ электроны e не могут преодолеть барьер $\Phi_{pn}/2$ на полуширине перехода (-), а дырки δ – на полуширине (+), из-за чего прямой ток отсутствует.

При большом прямом напряжении $U_{пр} > \Phi_{pn}$ электроны и дырки, преодолевая упомянутые барьеры за счёт потребления энергии от источника $U_{пр}$, переходят через p - n -переход, создавая прямой ток $I_{пр}$. Поскольку электроны на полуширине перехода (-) передают энергию, а на полуширине (+) потребляют её, то баланс энергии от прохождения электронов через переход нулевой. Аналогично и для дырок.

Так исчезает **Вопрос 3.** Поскольку переход в целом электрически нейтральный, то исчезает **Вопрос 5.**

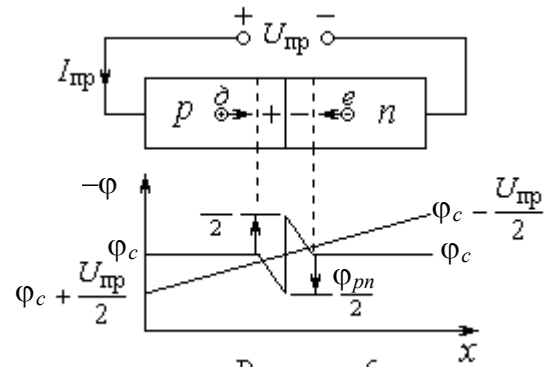


Рисунок 6

Результаты эксперимента. Все полученные в данной работе результаты были проверены экспериментально следующим образом. В основу эксперимента было положено непосредственное измерение падения напряжения на участках слоёв p и n вдали от границ перехода.

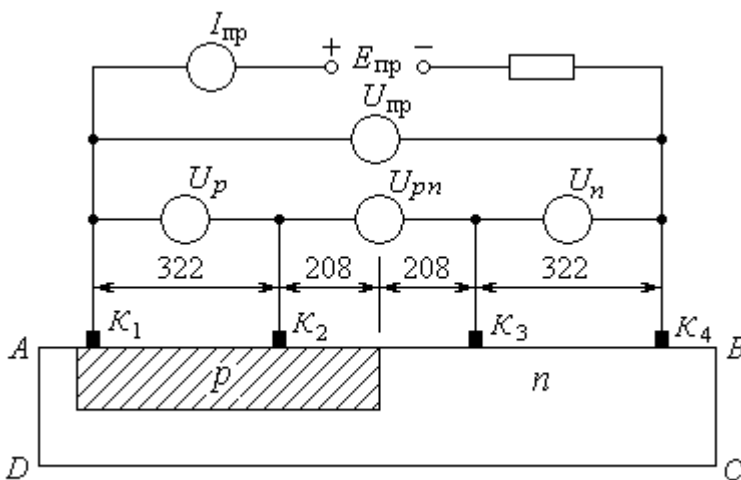


Рисунок 7

Для этого по заказу был выращен p - n -переход $ABCD$ (рис. 7) с дополнительными промежуточными выводами K_2 и K_3 от слоёв p и n за пределами собственно перехода.

Электрофизические свойства контактов в парах $K_1 - K_2$ и $K_3 - K_4$ одинаковые. Поэтому падения напряжений на этих контактах противоположные и не влияют на показания приборов U_p и U_n .

Тут же приведены геометрические размеры в микрометрах.

В процессе эксперимента измерялись:

– прямое напряжение на всём образце $U_{пр}$;

– падение напряжения на части p -слоя U_p ;

– падение напряжения на части n -слоя U_n ;

– падение напряжения U_{pn} на участках слоёв, примыкающих к переходу.

Полное напряжение на всей длине слоёв p и n рассчитывалось по формуле

$$U_{\text{сл}} = U_p + \frac{208}{322} U_p + U_n + \frac{208}{322} U_n = 1,64 (U_p + U_n). \quad (1)$$

Измеренное таким образом напряжение $U_{\text{сл}}$ сопоставлялось с показаниями прибора $U_{\text{пр}}$ с целью определить, к чему прикладывается прямое напряжение: к переходу, как принято считать, или к слоям p и n .

Результаты эксперимента следующие.

При прямом токе $I_{\text{пр}} = 2$ мА и прямом напряжении $U_{\text{пр}} = 1,3$ В показания приборов были: $U_p = 0,14$ В; $U_n = 0,6$ В.

После подстановки U_p и U_n в формулу (1) находим, что на слоях p и n падает напряжение $U_{\text{сл}} = 1,23$ В из всего подведенного $U_{\text{пр}} = 1,3$ В. Лишь 0,07 В, т.е. всего лишь 5,4% падает на собственно переходе.

Таким образом доказано, что прямое напряжение прикладывается не к переходу, как повсеместно утверждается, а к слоям p и n , создавая на них ускоряющие поля соответственно для дырок и электронов.

Дырки и электроны, потребляя энергию от этих полей, преодолевают полубарьеры $\Phi_{pn}/2$ на переходе, создавая прямой ток.

Что касается обратного напряжения, то под ним показания приборов U_p и U_n были нулевыми, а показания прибора U_{pn} составляли $U_{pn} = E_{\text{пр}}$, т.е. обратное напряжение целиком прикладывается к собственно p - n -переходу.

Токопрохождение при этом следующее: обратное напряжение обедняет переход подвижными носителями заряда, из-за чего обратный ток ничтожно мал.

Так, полученные результаты полностью описывают работу электронно-дырочного перехода и при этом не вызывают противоречий.

Выводы. 1. Синтезированная в данной работе модель электронно-дырочного перехода открывает наличие на его ширине не только известного тормозящего поля, но и неизвестного до сих пор равновеликого ускоряющего поля для основных носителей заряда.

2. Теоретически доказано и экспериментально подтверждено, что к p - n -переходу приложено только обратное напряжение, а прямое, в отличие от распространенного мнения, целиком прикладывается не к переходу, а к слоям p и n , т.е. падение напряжения на слоях p и n составляет величину

$$I_{\text{пр}} R_{\text{сл}} = U_{\text{пр}}. \quad (2)$$

В связи с этим известная эмпирическая формула

$$I_{\text{пр}} = I_0 \left(\exp \frac{U_{\text{пр}} - I_{\text{пр}} R_{\text{сл}}}{\Phi_T} - 1 \right) \quad (3)$$

требует пересмотра. Действительно, подставляя (2) в (3), получаем $I_{\text{пр}} = 0$, т.е. прямого тока нет.

3. Теоретически показано и экспериментально подтверждено, что прямой ток появляется не за счёт снижения потенциального барьера, который всегда остаётся неизменным, а из-за определённого количества энергии, которую подвижные основные носители заряда потребляют от источника прямого напряжения $U_{\text{пр}}$.

4. Показано, что любой электронно-дырочный переход является электрически нейтральным. Поэтому, в частности, невозможно измерить контактную разность потенциалов, ибо она точно скомпенсирована неучтёнными прежде поверхностными уровнями.

5. Синтезированная в данной работе модель электронно-дырочного перехода может быть использована для внесения поправок в его теорию.

Литература

1. Дулин В.Н. Электронные приборы. – М.: Энергия, 1977. – 225 с.
2. Пикус Г.Е. Основы теории полупроводниковых приборов. – М.: Наука, 1965. – 153 с.
3. Дулин В.Н. Электронные и квантовые приборы СВЧ. – М.: Энергия, 1972. – 9 с.
4. Батушев В.А. Электронные приборы. – М.: Высшая школа, 1980. – 48 с.
5. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы. – М.: ВШ, 1987. – 36 с.
6. Панфилов И.П., Иванченко В.Д. Парадоксы теории электронно-дырочного перехода // Информатика и связь: Сб. научн. трудов Укр. гос. акад. связи им. А.С. Попова: Техніка, 1985. – С. 84-87.