

ИЗЛОЖЕНИЕ ТЕМЫ «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В КОНТАКТАХ» В КУРСЕ ФИЗИКИ

В настоящее время в физике твердого тела и полупроводников теория контактных явлений базируется на последовательном применении квантовой теории [1; 2]. В курсах общей физики [3; 4; 5] и даже курсах физики твердого тела [6; 7], однако, до настоящего времени применяется упрощенный подход, основанный на использовании классических представлений об электронном газе, о потенциальной и кинетической энергии и электрона наряду с квантовым понятием об энергии Ферми. Это приводит к непоследовательному противоречивому толкованию контактных явлений, что не соответствует современным научным представлениям и затрудняет их понимание студентами. В данной статье предлагаем метод изложения контактных явлений, основанный на законах термодинамики и квантовой физики твердого тела, который отличается простотой и доступностью для понимания студентами.

1. *Контактная разность потенциалов между металлами.* При соприкосновении двух различных металлов между ними возникает разность потенциалов, называемая *контактной разностью потенциалов*. Основным исходным положением является условие термодинамического равновесия двух систем, способных обмениваться частицами. В частности, это условие выражается в равенстве электрохимических потенциалов двух систем, которые могут быть представлены как термодинамический потенциал, отнесенный к одной частице [8]:

$$\mu = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial N} \right)_{P,T}.$$

Тогда очевидно, что для электронов в твердых телах в случае термодинамического равновесия электрохимический потенциал будет равен энергии Ферми $\mu = \varepsilon_F$ [1].

Здесь необходимо отметить, что при построении энергетических диаграмм для электронов в твердых телах, находящихся в контакте, необходимо применять единую шкалу энергий, единое начало отсчета. Естественной шкалой энергий, применяемой как в случае невзаимодействующих, так и в случае контактирующих металлов, является энергетическая шкала с началом отсчета $\varepsilon = 0$ на бесконечности. Таким образом, условием равновесия систем электронов двух контактирующих металлов будет равенство их электрохимических потенциалов, отсчитанных относительно общего начала. Выравнивание энергий Ферми имеющих в контакте металлов осуществляется за счет преимущественного перехода электронов из металла с меньшей работой выхода в металл с большей работой выхода, вследствие чего устанавливается контактная

разность потенциалов, определяемая разностью работ выхода электронов из находящихся в контакте металлов $e\varphi_k = A_1 - A_2$. В условиях равновесия металл I будет во всех точках иметь электростатический потенциал φ_1 , а металл II – электростатический потенциал φ_2 . Между металлами I и II при термодинамическом равновесии установится контактная разность потенциалов $e\varphi_k = A_1 - A_2$, реально измеримая, определяющая контактное поле непосредственно в области контакта и в окружающем пространстве. Эта разность потенциалов будет единой макроскопической величиной, характеризующей условие равновесия двух электронных систем металлов, находящихся в контакте. Если шкалу энергий для металла I условиться считать неизменной, то при образовании контакта энергия любого электронного состояния металла II изменится на одну и ту же величину $e\varphi_k = A_1 - A_2$.

Вводимое во многих учебных пособиях по курсу общей физики и физики твердого тела [3; 4; 6; 7] понятие внутренней контактной разности потенциалов основано на применении классических представлений о потенциальной и кинетической энергии электронов внутри металла и не имеет физического смысла, так как не определяет реально измеримых на опыте величин: контактного поля и контактной разности потенциалов. Не имеет оснований также деление контактной разности потенциалов на внешнюю и внутреннюю. Эти выводы подтверждаются теорией и экспериментальными данными по исследованию полупроводниковых приборов, основанных на использовании р-п-переходов, гетеропереходов и переходов металл – полупроводник [2; 9; 10].

2. *Контактная разность потенциалов на р-п-переходе.* Рассмотрим энергетическую диаграмму контакта полупроводников с одинаковой шириной запрещенной зоны р- и п-типов, которая изображена на рисунке 1.

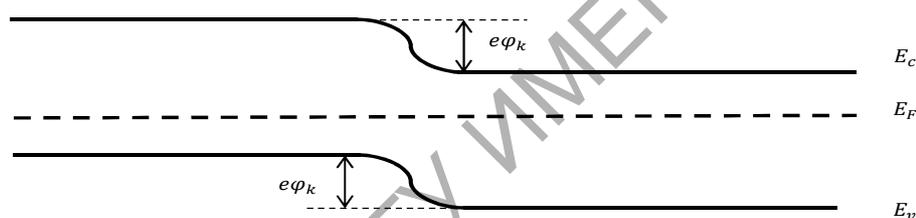


Рисунок 1 – Энергетическая диаграмма р-п-перехода

В этом случае, очевидно, контактная разность потенциалов будет равна разности энергетического положения краёв валентной зоны или зоны проводимости р- и п-типов. Так как для носителей заряда в невырожденных полупроводниках применима статистика Больцмана, то контактная разность потенциалов будет определять соотношение между концентрациями носителей тока каждого знака в р- и п-областях:

$$n_p = n_n e^{-\frac{e\varphi_k}{KT}}, \quad p_p = p_n e^{\frac{e\varphi_k}{KT}},$$

т. е. для контактной разности потенциалов $e\varphi_k = A_1 - A_2$ окажется справедливым выражение

$$\text{для так называемой «внутренней» разности потенциалов [3; 5; 7] } e\varphi_k = KT \ln \frac{n_2}{n_1}.$$

3. *Контактная разность потенциалов на гетеропереходе.* Из рассмотрения р-п-перехода может сложиться впечатление, что разность потенциалов, возникающая при контакте двух полупроводников, может быть определена двумя способами: как разность работ выхода электронов из двух контактирующих частей полупроводника или как энергетическое смещение положения краёв зон на контакте. Это, однако, справедливо только для контакта полупроводников с одинаковой шириной запрещенной зоны, т. е. физически одного исходного кристаллического вещества, легированного примесями различного типа. Такой подход, в частности, совершенно не применим для гетеропереходов.

На рисунке 2 приведена энергетическая схема гетероперехода – контакта полупроводников р- и п-типов, отличающихся шириной запрещенной зоны [2]. И в данном случае контактная разность потенциалов определяется как разность работ выхода электронов из соответствующих

полупроводников. Но она не равна энергетическому различию положения краев зон, а определяется суммой изгибов краев зон в приконтактной области $e\varphi_k = e\varphi_1 + e\varphi_2$ [2].

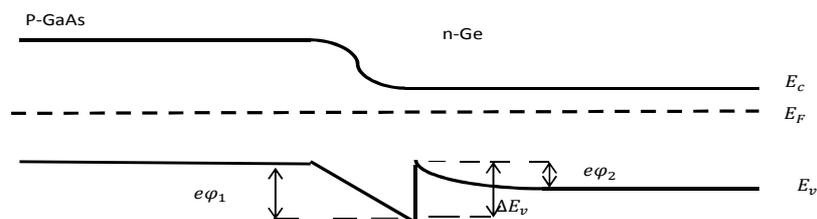


Рисунок 2 – Энергетическая диаграмма р-п-гетероперехода

4. *Контакт металл – полупроводник.* При определении контактной разности потенциалов в системе металл – полупроводник следует также руководствоваться общими принципами термодинамического равновесия двух систем, обменивающимися частицами. Так как контактное поле вследствие существенного различия концентрацией носителей заряда в металле и полупроводнике практически полностью локализовано в приконтактной области полупроводника, то изгиб зон полупроводника в приконтактной области будет равен контактной разности потенциалов. Контактная разность потенциалов в этом случае будет определять не соотношение концентраций электронов в объеме полупроводника и металла, а соотношение концентраций носителей заряда в объеме полупроводника и приконтактной области полупроводника, так что классическое соотношение $e\varphi_k = KT \ln \frac{n_2}{n_1}$ никоим образом не определяет контактной разности потенциалов металлов – полупроводник.

Таким образом, из рассмотренных примеров вытекают следующие выводы.

1. Основным фактором, определяющим контактную разность потенциалов двух находящихся в равновесии электронных систем, является равенство электрохимических потенциалов, т. е. общие условия термодинамического равновесия.

2. Для систем электронов в твердых телах условием равновесия является равенство энергий Ферми, отсчитанных в единой энергетической шкале (например, с началом отсчета в бесконечности).

3. Контактная разность потенциалов определяется разностью термодинамических работ выхода электрона из данного твердого тела вакуум.

4. Эта контактная разность потенциалов является единой электрической характеристикой двух систем и ее деление на внешнюю и внутреннюю не имеет физического смысла.

5. Классическое выражение для так называемой «внутренней» разности потенциалов может оказаться справедливым для контактной разности потенциалов в частном случае р-п-перехода невырожденных полупроводников с одинаковой шириной запрещенной зоны.

Список использованных источников

- 1 Бонч-Бруевич, В. А. Физика полупроводников / В. А. Бонч-Бруевич, С. Г. Калашников. – М. : Наука, 1977. – 375 с.
- 2 Милте, А. Гетеропереходы и переходы металл – полупроводник / А. Милте, Д. Фойхт. – М. : Наука, 1975. – 272 с.
- 3 Калашников, С. Г. Электричество / С. Г. Калашников. – М. : Наука, 1985. – 668 с.
- 4 Сивухин, Д. В. Общий курс физики / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1983. – Том 3. Электричество. – 677 с.
- 5 Телеснин, Р. В. Курс физики. Электричество / Р. В. Телеснин, В. Ф. Яковлев. – М. : Просвещение, 1970. – 488 с.
- 6 Шалимова, К. В. Физика полупроводников / К. В. Шалимова. – М. : Наука, 1985. – 378 с.
- 7 Епифанов, Г. И. Физика твердого тела / Г. И. Епифанов. – М. : Наука, 1977. – 479 с.
- 8 Ансельм, А. И. Основы статистической физики и термодинамики / А. И. Ансельм. – М. : Наука, 1973. – 487 с.
- 9 Пасынков, В. В. Полупроводниковые приборы / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин, А. Д. Шинков. – М. : Наука, 1981. – 273 с.
- 10 Зи, С. М. Физика полупроводниковых приборов / С. И. Зи. – М. : Наука, 1984. – 357 с.