

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ.
Н. Э. БАУМАНА**

Факультет: "Информатика и системы управления"

Кафедра: «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры»

БАРЬЕР ШОТТКИ

Краткий теоретический курс для подготовки к семинару по «Оценка высоты потенциального барьера в диоде Шоттки для различных металлов контакта при термодинамическом равновесии»

по дисциплине: «Физические основы микроэлектроники»

Автор: к.т.н., доцент Жалнин В.П.

Москва 2020 г

БАРЬЕР ШОТТКИ

Термодинамическая работа выхода в полупроводниках *p*- и *n*-типов

Все свободные электроны в полупроводнике находятся в потенциальной яме. Функция распределения этих электронов по степеням свободы описывается бoльцмановской статистикой:

$$f_0(E, T) = e^{-\frac{E-F}{kT}}$$

Из этого выражения следует, что если энергия электрона E существенно больше, чем энергия Ферми F , то всегда будет определенное число электронов с этой энергией. Следовательно, существует отличная от нуля вероятность f , что в условиях термодинамического равновесия часть электронов в полупроводнике будет обладать энергией $E > 0$, то есть они могут покидать поверхность полупроводника. Ток, обусловленный этими электронами, называется током термоэлектронной эмиссии. Таким образом, ток термоэлектронной эмиссии – это ток, обусловленный горячими равновесными электронами вследствие распределения энергии по степеням свободы.

Рассмотрим зонную диаграмму полупроводников *p*- и *n*-типов. На рис. 1 использованы следующие обозначения: χ – электронное сродство, E_g – ширина запрещенной зоны, Φ_n – объемное положение уровня Ферми в полупроводнике *n*-типа, Φ_p – объемное положение уровня Ферми в полупроводнике *p*-типа. Согласно определению термодинамической работы выхода $\Phi = -F$, получаем следующее выражение для термодинамической работы выхода в полупроводниках *n*-типа Φ_n и *p*-типа Φ_p :

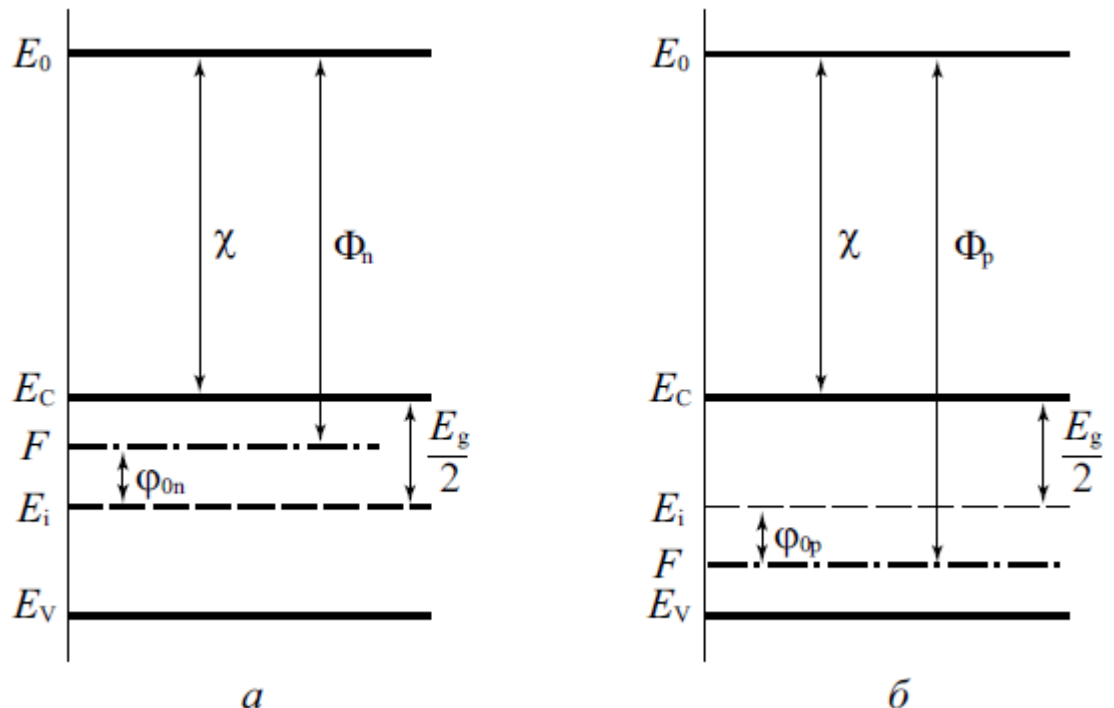


Рис.1. Зонная диаграмма полупроводника а) *n*-типа б) *p*-типа

$$\Phi_n = -F = \chi + \left(\frac{E_g}{2} - \Phi_{0n} \right) \quad (1.1)$$

$$\Phi_p = -F = \chi + \left(\frac{E_g}{2} - \varphi_{0p} \right) \quad (1.2)$$

(При рассмотрении предполагается, что уровень Ферми в собственном полупроводнике находится посередине запрещенной зоны, или $m_p^* = m_n^*$.

В противном случае в соотношениях (1.1) и (1.2) появится слагаемое

$$\frac{kT}{2 \ln \frac{N_c}{N_v}}$$

со знаком минус для полупроводников *n*-типа и со знаком плюс для полупроводников *p*-типа.)

Из соотношений (1.1) и (1.2) следует, что термодинамическая работа выхода из полупроводника *p*-типа всегда будет больше, чем из полупроводника *n*-типа, а следовательно, ток термоэлектронной эмиссии с полупроводника *n*-типа будет больше, чем с полупроводника *p*-типа.

КОНТАКТЫ МЕТАЛЛ–ПОЛУПРОВОДНИК

Первыми полупроводниковыми приборами в радиоэлектронике были детекторы, конструктивной основой которых является контакт металлической иглы из фосфористой бронзы и полупроводника. Их применение основано на обнаруженной ещё в 1874 г. зависимости проводимости точечного контакта металлической проволоки с некоторыми естественными полупроводниками от полярности приложенного напряжения. Кристаллические детекторы широко применялись вплоть до 30-х годов прошлого века, когда преимущественное развитие получила вакуумная электроника.

Однако в 40-х годах с освоением СВЧ-диапазона интерес к диодам на основе контакта металл–полупроводник вновь усилился, и не ослабевает по настоящее время. Это обусловлено хорошими высокочастотными свойствами контакта металл–полупроводник и развитием технологий изготовления полупроводниковых приборов.

СВОЙСТВА КОНТАКТА МЕТАЛЛ – ПОЛУПРОВОДНИК. БАРЬЕР ШОТТКИ

В радиоэлектронике контакты металл–полупроводник нашли естественное применение в качестве внешних выводов полупроводниковых приборов и в качестве быстродействующих диодов.

Соответственно различают невыпрямляющий омический контакт и выпрямляющий контакт металл–полупроводник, который называют барьером Шоттки (БШ), а соответствующий диод – диодом Шоттки. Проводимость невыпрямляющего омического контакта подчиняется закону Ома. Выпрямляющий контакт имеет нелинейную вольт-амперную характеристику, аналогичную ВАХ *p-n*-перехода.

Для данного типа проводимости полупроводника тип контакта зависит, прежде всего, от соотношения между значениями работы выхода электронов из полупроводника и из металла. Поскольку, однако, поверхность полупроводника всегда имеет естественный заряд, то тип контакта зависит также от знака и плотности заряда поверхности полупроводника. В модели идеального контакта заряд поверхности не учитывается, поверхность считается незаряженной. Другой крайний случай предполагает, что заряд

поверхности велик. И тогда свойства контакта определяются свойствами поверхности полупроводника, и не зависят от свойств металла.

Рассмотрим контакт металл – полупроводник. В случае контакта возможны различные комбинации (*p*- и *n*-типы полупроводника) и соотношения термодинамических работ выхода из металла и полупроводника. В зависимости от этих соотношений в области контакта могут реализоваться три состояния. Первое состояние соответствует условию плоских зон в полупроводнике, в этом случае реализуется нейтральный контакт. Второе состояние соответствует условию обогащения приповерхностной области полупроводника (дырками в *p*-типе и электронами в *n*-типе), в этом случае реализуется омический контакт. И наконец, в третьем состоянии приповерхностная область полупроводника обеднена основными носителями, в этом случае в области контакта со стороны полупроводника формируется область пространственного заряда ионизированных доноров или акцепторов и реализуется блокирующий контакт, или барьер Шоттки. В полупроводниковых приборах наибольшее применение получили блокирующие контакты металл – полупроводник, или барьеры Шоттки. Рассмотрим условие возникновения барьера Шоттки.

Ток термоэлектронной эмиссии с поверхности любого твердого тела определяется уравнением Ричардсона:

$$j_T = AT^2 \cdot e^{-\frac{\Phi}{kT}} \quad (1)$$

Для контакта металл – полупроводник *n*-типа выберем условие, чтобы термодинамическая работа выхода из полупроводника $\Phi_{п/п}$ была меньше, чем термодинамическая работа выхода из металла Φ_{Me} . В этом случае согласно уравнению (1) ток термоэлектронной эмиссии с поверхности полупроводника $j_{п/п}$ будет больше, чем ток термоэлектронной эмиссии с поверхности металла:

$$\Phi_{Me} > \Phi_{п/п}; \quad j_{Me} < j_{п/п}.$$

При контакте таких материалов в начальный момент времени ток из полупроводника в металл будет превышать обратный ток из металла в полупроводник и в приповерхностных областях полупроводника и металла будут накапливаться объемные заряды – отрицательные в металле и положительные в полупроводнике. В области контакта возникнет электрическое поле, в результате чего произойдет изгиб энергетических зон. Вследствие эффекта поля термодинамическая работа выхода на поверхности полупроводника возрастет. Этот процесс будет проходить до тех пор, пока в области контакта не выравняются токи термоэлектронной эмиссии и соответственно значения термодинамических работ выхода на поверхности.

На рис. 2 показаны зонные диаграммы различных этапов формирования контакта металл – полупроводник. В условиях равновесия в области контакта токи термоэлектронной эмиссии выравнялись, вследствие эффекта поля возник потенциальный барьер, высота которого равна разности термодинамических работ выхода:

$$\Delta\phi_{ms} = (\Phi_{Me} - \Phi_{п/п}).$$

Для контакта металл – полупроводник *p*-типа выберем условие, чтобы термодинамическая работа выхода из полупроводника $\Phi_{п/п}$ была больше, чем термодинамическая работа выхода из металла Φ_{Me} . В этом случае ток термоэлектронной эмиссии с поверхности

полупроводника $j_{п/п}$ будет меньше, чем ток термоэлектронной эмиссии с поверхности металла, согласно уравнению (1).

При контакте таких материалов в начальный момент времени ток из металла в полупроводник p -типа будет превышать обратный ток из полупроводника в металл и в приповерхностных областях полупроводника и металла будут накапливаться объемные заряды – положительные в металле и отрицательные в полупроводнике.

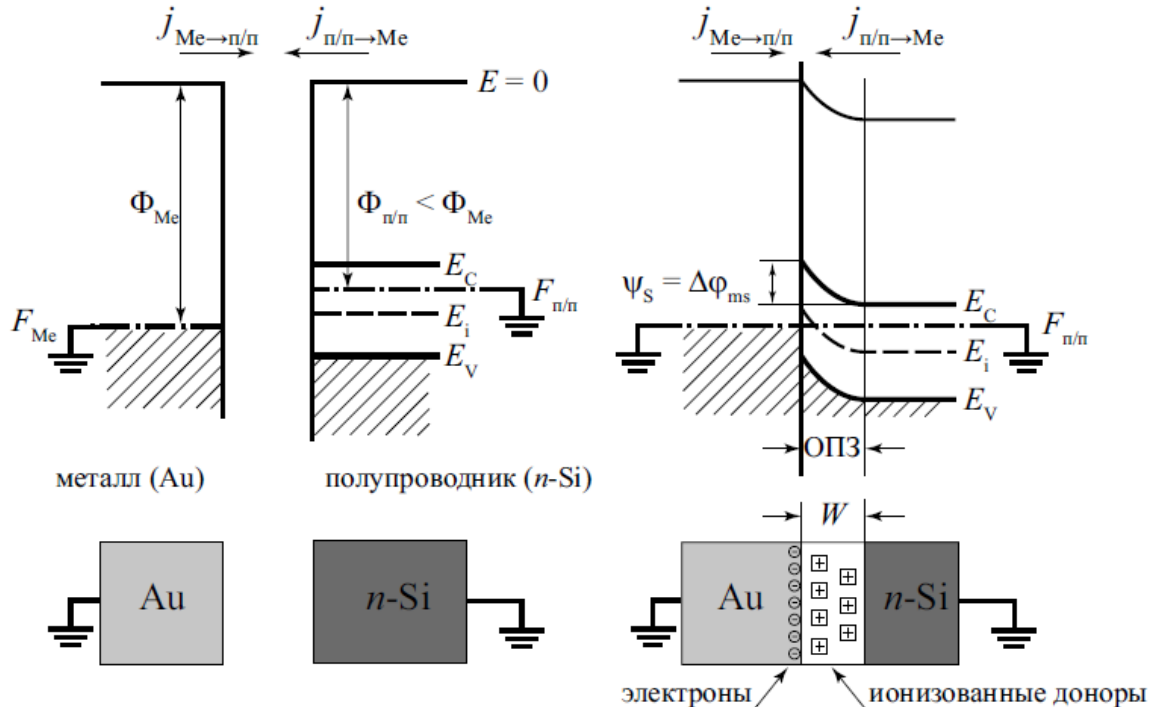


Рис. 2. Зонная диаграмма, иллюстрирующая образование барьера Шоттки

В дальнейшем картина перехода к равновесному состоянию и формирования потенциального барьера для контакта металл – полупроводник p -типа аналогична рассмотренной выше для контакта металл – полупроводник n -типа. Контактная разность потенциалов для случая, изображенного на рис.2:

$$\Delta\phi_{ms} = (\Phi_{Au} - \Phi_{Si}) = \Phi_{Au} - \chi - E_g/2 + \phi_0.$$

$$\phi_0 = kT \ln(N_D/n_i)$$

$$N_D = 1/(q\mu_n\rho)$$

где $\Delta\phi_{ms}$ - контактная разность потенциалов (высота барьера)

Φ_{Au} - работа выхода электрона для Au

χ - электронное сродство (**Энергией сродства атома к электрону**, или просто его **сродством к электрону**, называют энергетический эффект процесса присоединения электрона к свободному атому в его основном состоянии с превращением его в отрицательный ион (сродство атома к электрону численно равно, но противоположно по знаку энергии ионизации соответствующего изолированного однозарядного аниона).

E_g - ширина запрещенной зоны

ϕ_0 - объемное положение уровня Ферми

k - постоянная Больцмана
 T - температура Кельвина
 N_D - концентрация легирующего вещества (донорная концентрация)
 n_i - собственная концентрация носителей
 μ_n - подвижность электронов
 q - заряд электрона

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев В.В., Столяров А.А. Физические основы нанотехнологий. - М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана. 2011.
2. Гуртов В.А. Твердотельная электроника.-М.: Техносфера. 2005.
3. Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А. Основы нанотехнологий.- Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000.
4. Шик А.Я., Бакуева Л.Г., Мусихин С.Ф., Рыков С.А. Физика низкоразмерных систем, СПб, Наука, 2001.
5. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники, СПб, 2003.
6. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: учебное пособие для вузов. – 2-е изд. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2001.
7. Старосельский В.И. Физика полупроводниковых приборов микроэлектроники: учебное пособие. – М.: Юрайт, 2011.
8. Зиненко, В.И. Основы физики твердого тела [Текст]: учеб. пособие для вузов / В.И. Зиненко, Б.И. Сорокин, Р.И. Турчин. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2001. 336с.
9. Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника: Учебное пособие для вузов / Под ред. Н.Д. Федорова. М.: Радио и связь, 2002.
10. Зегря Г.Г., Перель В.И. Основы физики полупроводников. М.: Физматлит, 2009.
Н.А. Афанасьева, Л.П. Булат. Физические основы электроники. Учебное пособие. СПб.: СПб ГУНиПТ, 2010. -181с.
11. Андреев В.В., Балмашнов А.А., Корольков В.И., Лоза О.Т., Милантьев В.П. Физическая электроника и ее современные приложения. Учеб. пособие. М.: РУДН, 2008. – 383 с.