

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение  
высшего профессионального образования  
«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

Вакуумная и плазменная электроника

## **ИЗМЕРЕНИЕ КОНТАКТНОЙ РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ**

Методические указания к лабораторной работе  
для студентов направления  
210100.62 – Электроника и наноэлектроника

2013

**Аксенов, Александр Иванович**

Измерение контактной разности потенциалов = Вакуумная и плазменная электроника: методические указания к лабораторной работе для студентов направления 210100.62 – Электроника и наноэлектроника / А.И. Аксенов; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск : ТУСУР, 2013. - 19 с.

Целью настоящей работы является освоение методики измерения внешней контактной разности потенциалов между двумя проводящими материалами путем регистрации тока термоэмиссии. Контактная разность потенциалов между электродами существенно влияет на работу электронных приборов, особенно на временную стабильность параметров приборов. Выполнение данной работы позволит закрепить теоретические сведения о контактной разности потенциалов и экспериментально доказать характер влияния внешней контактной разности потенциалов на характеристики и параметры различных электронных приборов.

В ходе выполнения работы у студентов формируется способность осуществлять сбор и анализ исходных данных для расчета и проектирования электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения (ПК-9); способность аргументировано выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения (ПК-20).

Пособие предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению 210100.62 – Электроника и наноэлектроника по курсу «Вакуумная и плазменная электроника».

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ  
Зав.кафедрой ЭП  
\_\_\_\_\_ С.М. Шандаров  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 г.

Вакуумная и плазменная электроника

## **ИЗМЕРЕНИЕ КОНТАКТНОЙ РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ**

Методические указания к лабораторной работе  
для студентов направления 210100.62 – Электроника и наноэлектроника

Разработчик

канд. техн. наук, доц. каф.ЭП  
\_\_\_\_\_ А.И. Аксенов  
\_\_\_\_\_ 2013 г

2013

## СОДЕРЖАНИЕ

1 Введение .....	5
2 Теоретическая часть .....	5
2.1 Работа выхода .....	5
2.2 Контакт разнородных металлов.....	6
2.3 Сопротивление течению, проводимость .....	8
2.4 Методика измерения контактной разности потенциалов.....	11
2.5 Контрольные вопросы .....	14
3 Экспериментальная часть .....	15
3.1 Задание .....	15
3.2 Схема экспериментального определения контактной разности потенциалов .....	16
3.3 Порядок выполнения работы и методические указания .....	17
3.4 Содержание отчета .....	17
Рекомендуемая литература .....	18

## 1 Введение

Целью настоящей работы является освоение методики измерения внешней контактной разности потенциалов между двумя проводящими материалами путем регистрации тока термоэмиссии. Контактная разность потенциалов между электродами существенно влияет на работу электронных приборов, особенно на временную стабильность параметров приборов. Выполнение данной работы позволит закрепить теоретические сведения о контактной разности потенциалов и экспериментально доказать характер влияния внешней контактной разности потенциалов на характеристики и параметры различных электронных приборов.

В ходе выполнения работы у студентов формируется способность осуществлять сбор и анализ исходных данных для расчета и проектирования электронных приборов, схем и устройств различного функционального назначения (ПК-9); способность аргументировано выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров и характеристик приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения (ПК-20).

## 2 Теоретическая часть

### 2.1 Работа выхода

Энергетическое состояние свободных электронов металла или энергетический спектр электронов принято изображать энергетической диаграммой (рис.2.1). Основными уровнями этой диаграммы являются:

$E_c$  - дно зоны проводимости - минимальная кинетическая энергия электронов проводимости металла;

$E_F$  - уровень Ферми - энергетический уровень, вероятность заполнения которого равна 0,5, или максимальная кинетическая энергия электронов проводимости при абсолютном нуле температуры;

$E_v$  - уровень вакуума - такая кинетическая энергия электрона, при которой он может преодолеть все силы, связывающие его с данным образцом металла, т.е. при такой кинетической энергии он сможет эмитировать из металла в вакуум.

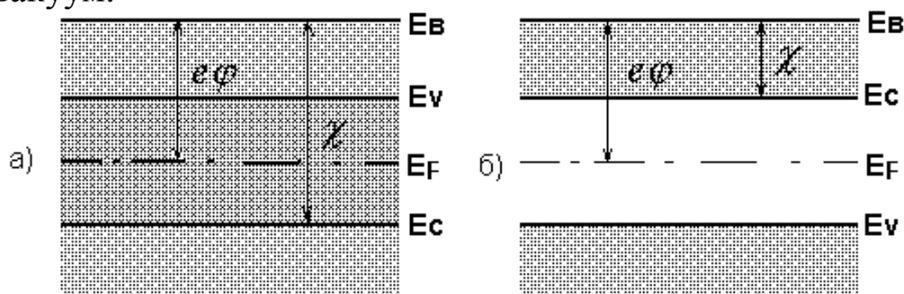


Рисунок 2.1 - Энергетическая диаграмма: а) металл, б) полупроводник

При конечной температуре  $T > 0$  с определенной вероятностью  $F(E) < 1$  заполнены разрешенные уровни  $E$  как ниже, так и выше  $E_F$ . Удаление электрона из образца металла, например, путем туннелирования с уровня ниже  $E_F$  – к его нагреванию. Удаление электрона с уровня  $E_F$  не нарушает термодинамического равновесия образца. Поэтому разность энергий  $E_B$  и  $E_F$  носит название *термодинамической работы выхода*:

$$E_B - E_F = e\phi \quad (2.1)$$

Все сказанное распространяется и на полупроводники.

Работа выхода вещества определяется экспериментально, является его важнейшим параметром. Результаты экспериментальных исследований дают для одних и тех же веществ различные значения работы выхода, что обусловлено рядом причин. В частности, обнаружено, что различные грани монокристалла имеют несколько различную работу выхода. Кроме того, на работу выхода оказывает существенное влияние наличие на поверхности образца атомов посторонних веществ, которые за счет ионизации или поляризации электрическим полем кристаллической решетки образца создают у ее границы двойной слой электрических зарядов, искажающих форму поверхностного потенциального барьера. Например, адсорбция атомов элементов групп I и II периодической системы, отдающих валентные электроны кристаллу и заряжающихся положительно, приводит к уменьшению работы выхода, тогда как кислород и галоиды вызывают обратный эффект. В наибольшей степени влияние поверхностных атомов проявляется в случаях, когда они покрывают кристалл моноатомной пленкой. Наконец, работа выхода зависит от температуры образца, так как от температуры зависит положение уровня Ферми: слабо у металлов и сильно – у примесных полупроводников.

## 2.2 Контакт разнородных металлов

Проведем мысленный эксперимент: возьмем два разнородных металла с работами выхода  $E_{F1}$  и  $E_{F2}$  и приведем их в соприкосновение (рис. 2.2).

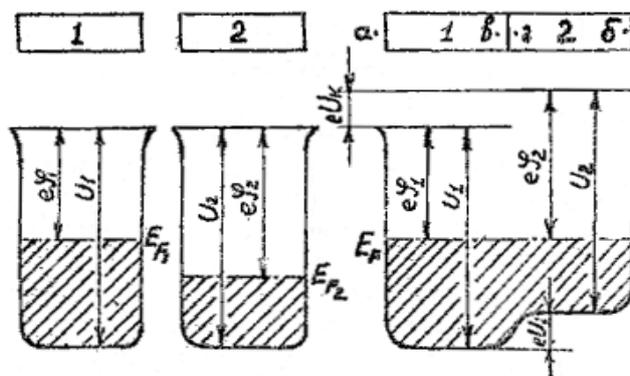


Рисунок 2.2 - Энергетическая диаграмма контакта разнородных металлов

Между ними начнется интенсивный обмен электронами, поскольку  $E_{F1} > E_{F2}$ , электроны будут преимущественно протекать (туннелировать под потенциальный барьером) из металла 1 на свободные и ниже расположенные уровни металла 2, который вследствие этого зарядится отрицательно (см. рис. 2.2). Потенциальная энергия электронов тела, заряжающегося отрицательно, возрастает. На энергетической диаграмме это отобразится поднятием всех его энергетических уровней (см. рис.2.2). Для тела, заряжающегося положительно, уменьшение потенциальной энергии электронов отобразится опусканием всех уровней его энергетической диаграммы. При электронном обмене приведенных в контакт образцов это взаимное смещение энергетических уровней будет продолжаться до тех пор, пока не установятся на одной высоте уровни Ферми  $E_{F1}$  и  $E_{F2}$  с образованием единого для данной системы уровня Ферми  $E_F$  (здесь просматривается полная аналогия с установлением единого уровня жидкости в системе сообщающихся сосудов).

В результате того, что рассматриваемые образцы приобрели различный заряд, между точками вакуума расположенных в непосредственной близости от поверхностей образцов (но вне линии контакта) устанавливается разность потенциалов  $U_K$ , называемая *внешней контактной разностью потенциалов* (КРП), (см. рис.2.2):

$$U_K = \frac{(\varphi_2 - \varphi_1)}{e} = \varphi_2 - \varphi_1 \quad (2.2)$$

Для возникновения внешней КРП не обязательно приводить образцы в непосредственный контакт. Достаточно создать условия обмена электронами, например, путем термоэлектронной эмиссии. В цепи, состоящей из нескольких последовательно соединенных полупроводников, величина КРП между крайними проводниками не зависит от работы выхода промежуточных проводников.

После соприкосновения образцов и установления единого уровня Ферми обмен электронами определяется разностью кинетических энергий электронов, находящихся на уровне Ферми, т.е.  $(E_{F1} - E_{C1}) - (E_{F2} - E_{C2})$ . Более быстрые электроны переходят из образца 1 в образец 2, т.к.  $(E_{F1} - E_{C1}) > (E_{F2} - E_{C2})$ , создавая вдоль линии контакта внутреннюю КРП:

$$U_i = \frac{1}{e} (E_{F1} - E_{F2}) \quad (2.3)$$

если вести отсчет от дна зоны проводимости. Заметим, что энергии  $E_{F1}$  и  $E_{F2}$  в металлах определяются концентрациями электронов проводимости, следовательно, внутренняя КРП создается в конечном счете за счет диффузии электронов из металла с большей концентрацией электронного газа, в металл с меньшей концентрацией. Равновесие устанавливается тогда, когда диффузионный ток становится равным встречному дрейфовому току,

создаваемому полем внутренней КРП. Вследствие высокой концентрации электронов проводимости в металлах, область локализации внутренней КРП мала - порядка постоянной кристаллической решетки. Потенциальный барьер такой малой ширины электроны свободно преодолевают путем туннелирования, поэтому зона контакта металла не обладает ни значительным сопротивлением, ни вентильными свойствами.

Важным свойством внутренней КРП металлов является ее зависимость от температуры. Это является следствием того, что уровень Ферми в металле хотя и слабо, но зависит от температуры:

$$E_F(T) = E_F(0) \cdot \left[ 1 - \frac{\pi^2}{12} \left( \frac{kT}{E_F(0)} \right)^2 \right], \quad (2.4)$$

где  $E_F(T)$  - уровень Ферми при температуре  $T$ ;  $E_F(0)$  - уровень Ферми при абсолютном нуле температуры;  $k$  - постоянная Больцмана.

Поэтому для внутренней КРП имеем:

$$U_i = \frac{1}{e} \left[ (E_{F1}(0) - E_{F2}(0)) + \frac{\pi^2}{12} (kT)^2 \cdot \left( \frac{1}{E_{F2}^{(0)}} - \frac{1}{E_{F1}^{(0)}} \right) \right] \quad (2.5)$$

Зависимость  $U_i(T)$  является одной из причин появления термоэлектрических эффектов и лежит в основе принципа действия термопары.

Оценку величины уровня Ферми металлов при абсолютном нуле производят по формуле :

$$E_F(0) = \frac{\pi^2 \cdot \hbar^2}{2m_e} \left( \frac{3n}{\pi} \right)^{2/3} = \frac{h^2}{8m_e} \cdot \left( \frac{3n}{\pi} \right)^{2/3}, \quad (2.6)$$

где  $h$  - постоянная Планка -  $6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с

$\hbar = h/2\pi = 1,054 \cdot 10^{-34}$  Дж·с

$m_e$  - масса покоя электрона -  $9,109 \cdot 10^{-31}$  кг

$n$  - концентрация электронов проводимости металла.

### 2.3 Сопротивление течению, проводимость

Характерными особенностями энергетического спектра невырожденного полупроводника являются :

- 1) расположение уровня Ферми в запрещенной зоне ;
- 2) зависимость положения уровня Ферми от концентрации и типа примесных центров и температуры.

Рассмотрим контакт металла с полупроводником  $n$  - типа. На рис.2.3

показаны энергетические диаграммы металла и электронного полупроводника до введения их в контакт. Основными уровнями энергетической диаграммы полупроводника являются:

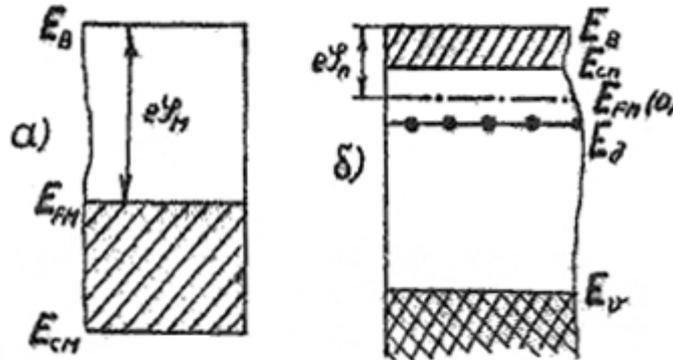
$E_v$ - потолок валентной зоны;

$E_{сп}$  – дно зоны проводимости;

$E_d$  – примесный уровень, в данном случае уровень доноров;

$E_{FN}(0)$  – положение уровня Ферми при нулевой температуре  $T=0$  К;

Для полупроводника n-типа уровень Ферми  $E_{FN}(0)$  расположен посередине между уровнями  $E_d$  и  $E_{сп}$ .



а) диаграмма металла; б) диаграмма полупроводника n-типа

Рисунок 2.3 - Энергетические диаграммы металла и полупроводника n-типа

Наиболее часто встречается случай, когда термодинамическая работа выхода металла  $e\varphi_M$  больше таковой для полупроводника  $e\varphi_P$  (см.рис. 2.3) После приведения указанных образцов в контакт происходит, как уже отмечалось, перемещение определенной части электронов проводимости из образца с меньшей работой выхода в образец с большей работой выхода  $e\varphi$ . В результате в системе контактирующих образцов устанавливается единый уровень Ферми и образуется внешняя КРП :

$$U_K = \frac{1}{e}(e\varphi_M - e\varphi_P) = \varphi_M - \varphi_P \quad (2.7)$$

Из-за высокой концентрации электронов проводимости контактный потенциал практически не проникает в толщу металла. Глубина  $d$  тем больше, чем больше КРП и чем меньше степень легирования полупроводника (т.е. меньше концентрация электронов последнего):

$$d = \left( \frac{2\varepsilon_0 U_K}{eN_d} \right)^{1/2}, \quad (2.8)$$

где  $\varepsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника;

$\varepsilon_0$  - диэлектрическая проницаемость вакуума;

$e$  - заряд электрона;  $N_d$  - концентрация донорных центров.

Обедненный подвижными носителями слой полупроводника толщиной  $d$  обладает большим сопротивлением и носит название запирающего слоя. Решение уравнения Пуассона приводит к выводу, что КРП в пределах запирающего слоя распределена по параболическому закону, т.е. все энергетические уровни полупроводника, кроме уровня Ферми, изогнуты по параболе на расстоянии  $d$ . Учитывая, что полупроводник n-типа в контакте с металлом при условии  $e\varphi_M > e\varphi_n$  заряжается положительно, согласно правилу смещения уровней, данному в подразделе 2.2, считают, что уровни изогнуты вниз. Энергетическая диаграмма контакта металл-полупроводник n-типа приведена на рис.2.4.

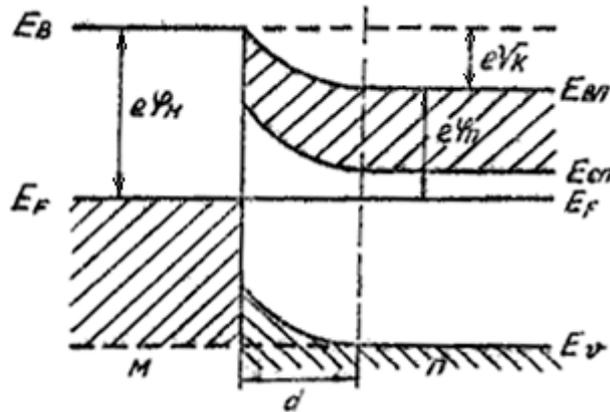


Рисунок 2.4 - Энергетическая диаграмма контакта металл-полупроводник n-типа

Замечательным свойством запирающего слоя является резкая зависимость его сопротивления от направления приложенной внешней разности потенциалов. Она приводит практически к односторонней (униполярной) проводимости контакта. Контакт легко проводит ток в "прямом" направлении, когда к полупроводнику приложен минус внешнего источника напряжения, и практически не проводит в "обратном" направлении, т.е. в противоположном случае. Такой контакт называют выпрямляющим.

Аналитическое выражение вольт-амперной характеристики ( ВАХ ) рассматриваемого контакта имеет вид :

$$I = I_{SK} \left( \exp \pm \frac{eU}{kT} - 1 \right), \quad (2.9)$$

знак плюс относится к прямому смещению, минус – к обратному. Ток насыщения  $I_{SK}$  обусловлен переносом электронов из металла в полупроводник. По теории Давыдова – Шоттки:

$$I_{SK} = S\sigma \left[ \frac{2N_d(eU_K \pm eU)}{\varepsilon_0} \right]^{1/2} \cdot \exp\left(-\frac{eU}{kT}\right), \quad (2.10)$$

где  $S$  – площадь контакта;

$\sigma$  - удельная проводимость полупроводника за пределами запирающего слоя.

Графическое изображение ВАХ контакта металл – полупроводник n-типа показано на рис. 2.5.

Потенциальный барьер контакта металл-полупроводник называется барьером Шоттки. На его основе разработаны диоды Шоттки, отличающиеся монополярной проводимостью, т.е. тем, что ток в них переносится только одним видом носителей. Переключение такого диода с прямого направления на обратное не связано с процессом рекомбинации носителей, поэтому время переключения весьма мало. В современных диодах Шоттки оно доведено до  $10^{-11}$  с. Это позволяет с успехом применять их в импульсной и вычислительной технике, в технике СВЧ.

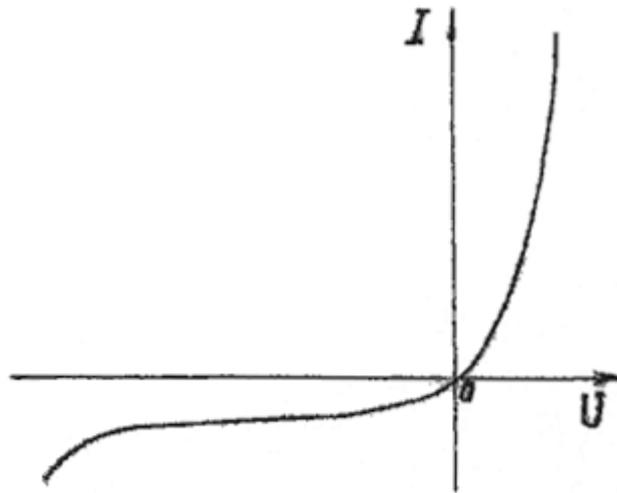


Рисунок 2.5 - Вольтамперная характеристика контакта металл-полупроводник n-типа

Не меньшее значение в электронной технике имеет контакт невыпрямляющий, т.е. контакт, одинаково проводящий ток в обоих направлениях. Такой контакт принято называть омическим. Контакт металла с полупроводником n-типа будет омическим, если полупроводник в приконтактной области будет сильно вырожденным, т.е. его уровень Ферми займет положение в зоне проводимости. Тогда к этому контакту применимо все сказанное в подразделе 2.2 о контакте разнородных металлов.

#### 2.4 Методика измерения контактной разности потенциалов

Как отмечено в подразделе 2.2, в цепи, состоящей из нескольких последовательно соединенных проводников, КРП между крайними проводниками не зависит от параметров промежуточных проводников.

Попытка измерить КРП путем присоединения к крайним проводникам вольтметра была бы грубой ошибкой. Показания прибора при этом будут нулевыми, поскольку само присоединение создает два дополнительных

контакта со своими КРП таких величин, при которых напряжение на клеммах вольтметра будет отсутствовать. В замкнутой электрической цепи суммарная КРП равна нулю.

В настоящей работе используется метод измерения КРП путем регистрации тока термоэмиссии. При этом катодом должен быть образец с меньшей работой выхода, а анодом - образец с большей работой выхода. Разумеется, оба образца должны находиться в вакууме, а температура катода должна регулироваться в широких пределах,

В качестве контактирующих образцов в данной работе используются катод и анод вакуумного диода. Образцы приводятся в контакт с помощью внешней цепи, включающей в себя источник анодного напряжения. Если в диоде применен прямонакальный катод, то образуется контакт эмитирующего материала катода и материала анода. В случае диода с оксидным катодом - контакт материала анода с полупроводником  $n$ -типа.

Оксидный катод представляет собой композицию окислов бария, стронция и калия, легированную донорной примесью атомов бария. Таким образом он является примесным широкозонным электронным полупроводником. Оксидный слой наносится на поверхность металлического зерна. Наибольшая концентрация донорных центров создается в зоне контакта оксида с зерном, так, что в этой зоне оксидный слой является вырожденным полупроводником  $n$ -типа. По этой причине контакт оксидного слоя с зерном является омическим. Отмечается лишь повышенное сопротивление контакта и наличие термо - э.д.с. между оксидным слоем и зерном, которая, однако, мала по сравнению с падением напряжения в оксидном слое, образующегося за счет протекания по нему эмиссионного тока. Из всех контактных явлений в диоде с оксидным катодом наибольшее значение имеет внешняя КРП между оксидным слоем и материалом анода.

Благодаря большой ширине запрещенной зоны ( $\Delta E \approx 3,8 - 4,8$  эВ) положение уровня Ферми оксидного слоя весьма слабо зависит от температуры, поэтому может не наблюдаться температурной зависимости КРП. Однако КРП в вакуумном диоде с оксидным катодом резко зависит от состояния поверхности анода. В частности, испарение бария с катода и его адсорбция анодом приводит к значительному изменению работы выхода анода и, следовательно, к изменению КРП. Необходимо отметить, что по этой причине происходит изменение КРП между катодом и управляющей сетной электронных ламп. Это приводит к сдвигу анодно-сеточных характеристики и является крайне отрицательным фактором. Для устранения этого явления в лампах применяют золотое покрытие управляющей сетки. Адсорбированный барий интенсивно диффундирует в толщу золота, в результате чего поверхность сетки остается свободной от бария и работа выхода сетки, а вместе с ней и КРП, стабилизируются.

Напряжение между электродами в электронных лампах складывается из напряжения, измеряемого непосредственно вольтметром, и контактной разности потенциалов. Оценить величину КРП в вакуумном диоде можно, если знать ее влияние на ход ВАХ диода. При этом совершенно необходимо

исключить влияние пространственного заряда эмитированных электронов на процесс эмиссии катода и на движение электронов к аноду. Это достигается таким выбором температуры катода, при котором термоэмиссия настолько мала, что невозможно образование сколько-нибудь существенного пространственного заряда в промежутке анод-катод.

Если напряжение между катодом и анодом в диоде отрицательное, то при отсутствии пространственного заряда величина анодного тока может быть определена из соотношения:

$$I_a = I_{\text{э}} \cdot \exp\left(-\frac{e \cdot U_a}{kT}\right), \quad (2.11)$$

где  $I_{\text{э}}$  - ток эмиссии катода;  $T$  - температура катода, К;  $e$  – заряд электрона;  $k$  - постоянная Больцмана.

Так как

$$U_a = U_a' + U_k, \quad (2.12)$$

где  $U_a'$  - напряжение, измеряемое вольтметром;

$U_k$  - контактная разность потенциалов между катодом и анодом;

$U_a$  - потенциал анода,

то выражение (2.12) может быть переписано в следующем виде:

$$I_a = I_{\text{э}} \cdot \exp\left(-\frac{e \cdot (U_a' - U_k)}{kT}\right). \quad (2.13)$$

Если  $U_a \geq 0$ , то все электроны достигают анода и тогда  $I_a = I_{\text{э}}$ . Из выражения (2.13) видно, что наличие КРП вызывает сдвиг вольт-амперной характеристики по оси абсцисс. Величина этого сдвига зависит от знака и величины КРП.

На рис.2.6 изображены вольтамперные характеристики вакуумного диода для случаев

$$U_k = 0, U_k > 0 \text{ и } U_k < 0$$

В точке А экспоненциальная кривая переходит в прямую, переход осуществляется достаточно плавно, так как полностью исключить влияние объемного заряда практически трудно. Для определения КРП необходимо знать координаты точки А на вольтамперной характеристике. Для точного определения координат следует воспользоваться зависимостью  $\ln I_a = f(U_a)$ , так как натуральный логарифм экспоненты есть прямая линия, то зависимость  $\ln I_a = f(U_a)$  претерпевает в точке А более резкий излом, чем зависимость  $I_a = f(U_a)$ . На рис. 2.6, б. абсцисса точки А определяется точкой пересечения различных участков характеристики. Ордината точки А дает логарифм тока эмиссии катода. Тангенс угла наклона прямой обратно

пропорционален температуре катода  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{e}{kT}$ .

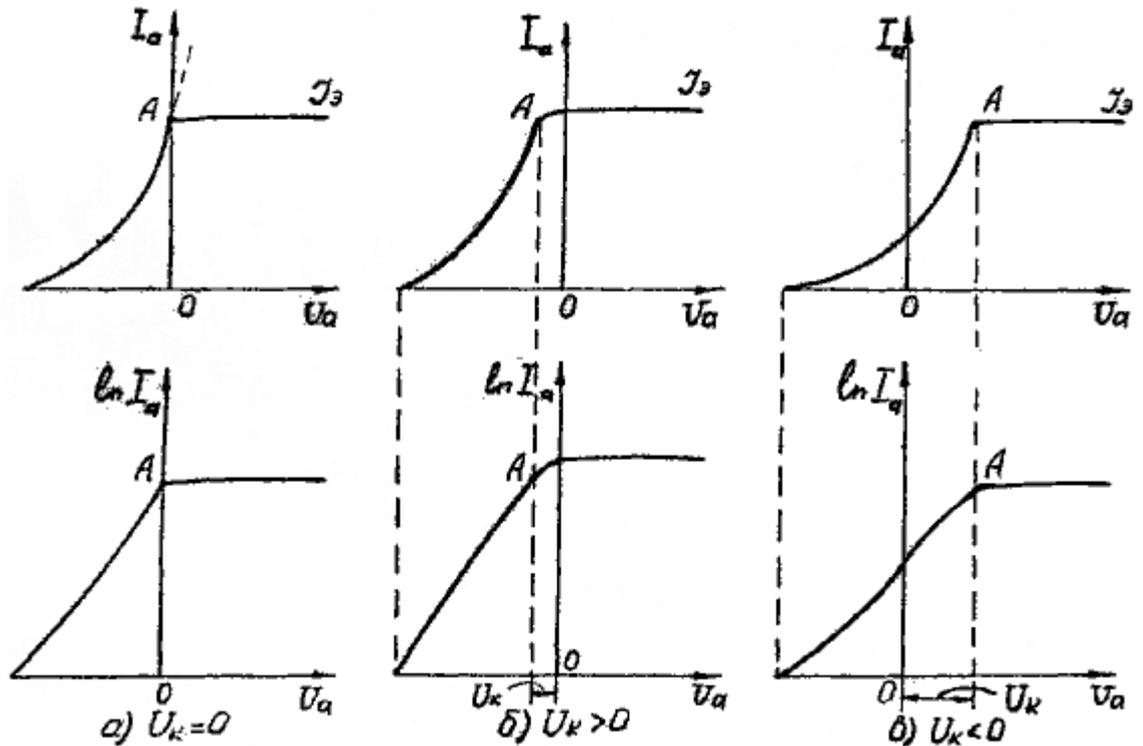


Рисунок 2.6 - Вольтамперные характеристики вакуумного промежутка при  $U_k=0$ ,  $U_k<0$  и  $U_k>0$

## 2.5 Контрольные вопросы

1. Дать определение работы выхода. Перечислить, от чего зависит эта величина.
2. Объяснить возникновение КРП при контакте металл – металл.
3. Объяснить температурную зависимость КРП.
4. Перечислить особенности энергетического спектра электронов полупроводника, привести его диаграмму.
5. Объяснить возникновение КРП при контакте металл – полупроводник.
6. Перечислить следствия, к которым приводит возникновение КРП.
7. Привести аналитический и графический вид ВАХ запирающего слоя.
8. Объяснить характерную особенность барьера и диодов Шотки. Сформулировать преимущества диодов Шотки, перечислить области их применения.
9. Изложить методику измерения КРП.
10. Классифицировать оксидный катод как полупроводник.
11. Объяснить роль КРП в электронных лампах. Изложить способы защиты электронных ламп от проявления КРП.



### 3.2 Схема экспериментального определения контактной разности потенциалов

Так как для исключения влияния пространственного заряда зависимость  $I_a = f(U_a)$ , позволяющая определить КРП, должна сниматься при малых значениях тока эмиссии, а следовательно, и низких температурах катода, то непосредственно измерение анодного тока исследуемого диода затруднено. Для измерения анодного тока в работе используется усилитель постоянного тока, входящий в состав лабораторного стенда. Схема включения исследуемого диода и усилителя постоянного тока (УПТ) изображена на рис.3.1.

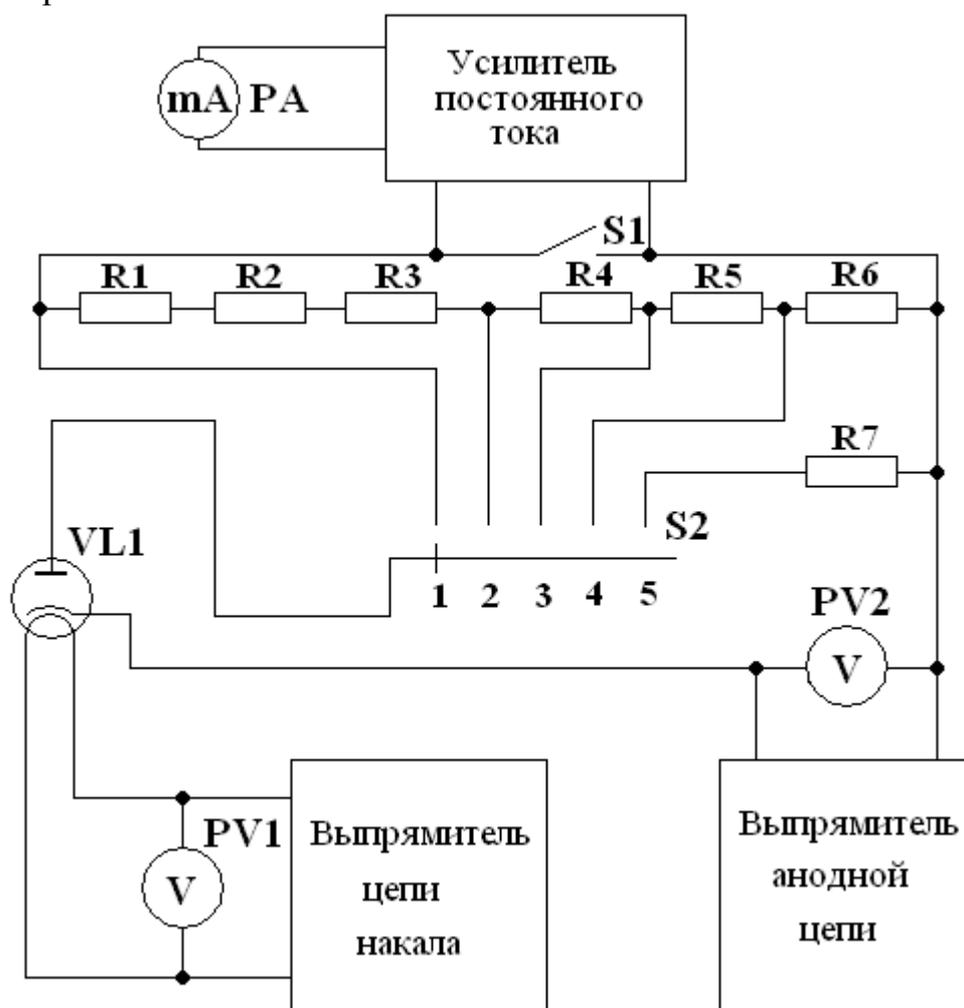


Рисунок 3.1 – Схема измерения контактной разности потенциалов

На исследуемый диод VL1 подается анодное напряжение от источника питания  $E_a$ , нить накала питается постоянным напряжением  $U_n$ . Оба напряжения плавно регулируются от 0 до 3 В и регистрируются вольтметрами PV1 и PV2. Цепь тока анода замыкается через набор измерительных резисторов R1 – R6. Протекая по цепочке измерительных резисторов ток анода создает на последних падение напряжения, зависящее от величины  $I_a$  и от количества включенных резисторов (закон Ома), Коммутация измерительной цепи анодного тока осуществляется

переключателем S1;

в положении 1 - ток протекает через резисторы R1 – R6 ( диапазон измерений  $10^{-7}$  А );

в положении 2 - через резисторы R4 – R6 (диапазон измерений  $10^{-7} – 10$  А)

в положении 3 - через резисторы R5 – R6 ( диапазон измерений  $10^{-7} – 10^2$  А );

в положении 4 - через резистор R6 ( диапазон измерений  $10^{-7} – 10^3$  А );

в положении 5 - производится калибровка УПТ.

в замкнутом положении тумблера S2 производится установка нуля УПТ.

### 3.3 Порядок выполнения работы и методические указания

3.3.1. Перед началом работы преподаватель проверяет подготовленность студентов к занятию.

3.3.2. Студенты составляют план эксперимента и после его обсуждения с преподавателем производится включение стенда.

3.3.3. Перед снятием каждой зависимости  $I_a = f(U_a)$ , и при переходе с одного предела измерений на другой необходимо, согласно инструкции по работе с УПТ, провести калибровку и установку нуля последнего.

3.3.4. При обработке результатов и построении зависимостей  $I_a = f(U_a)$ , необходимо учесть, что напряжение на аноде исследуемого диода не совпадает с показаниями вольтметра и находится из соотношения

$$U_a = E_a - I_a \times R_{1-6} , \quad (3.2)$$

где  $E_a$  - показания вольтметра P1;  $I_a$  - ток, протекающий через диод и измерительные сопротивления, регистрируемый УПТ;  $R_{1-6}$  - известные измерительные сопротивления :

$$R1 = 10^6 \text{ Ом}, R2 = 10^6 \text{ Ом}, R3 = 4,3 \times 10^5 \text{ Ом}, R4 = 2,44 \times 10^5 \text{ Ом}, \\ R5 = 2,44 \times 10^4 \text{ Ом}, R6 = 2,7 \times 10^3 \text{ Ом}.$$

3.3.5. После изменения напряжения накала необходимо дать возможность катоду прогреться в течение 3-5 мин, и только после этого приступать к снятию следующей зависимости.

3.3.6 Результаты эксперимента занести в таблицу, провести их обработку, построить необходимые графики и определить КРП для трех - четырех значений температур катода исследуемого диода.

### 3.4 Содержание отчета

Отчет должен содержать:

2. Введение

3. Описание установки и методики эксперимента

4. Основные расчетные формулы
5. Результаты работы и их анализ
6. Выводы (ПК-9, ПК-20)
7. Список литературы

### **Рекомендуемая литература**

1. Фридрихов С.А., Мовкин СМ. Физические основы электронной техники. - М.: Высшая школа, 1982, - 608 с.
2. Соболев В.Д. Физические основы электронной техники.- М.: Высшая школа, 1979.- 448 с.
3. Викулин И.Ы. Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. - М.: Сов.радио, 1980, - 296 с.
4. Епифанов Г.И. Физика твердого тела.- М.: Высшая школа, 1977. - 288 с.
5. Никонов Б,П. Оксидный катод,- М.: Энергия, 1979.-240 о.
6. ГОСТ 22622-77. Материалы полупроводниковые. Термины и определения основных электрофизических параметров.

Учебное пособие

Аксенов А.И.

Измерение контактной разности потенциалов

Методические указания к лабораторной работе  
по дисциплине «Вакуумная и плазменная электроника»

Усл. печ. л. \_\_\_\_\_. Препринт  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники  
634050, г.Томск, пр.Ленина, 40