

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

М.М. Славникова  
С.А. Артищев

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ И ВОЛЬТФАРАДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА**

Методические указания к лабораторному занятию по дисциплине  
«Физические основы микро- и наноэлектроники»

Томск  
2022

УДК 538.915  
ББК 22.35  
С 470

Рецензент

**Еханин С.Г.**, доцент кафедры конструирования узлов и деталей РЭА, доктор физ.-мат. наук

**Славникова Марина Михайловна, Артищев Сергей Александрович**

Исследование вольтамперных и вольтфарадных характеристик полупроводникового диода: методические указания к лабораторному занятию по дисциплине «Физические основы микро- и нанoeлектроники» / М.М. Славникова, С.А. Артищев. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022. – 13с.

В методических указаниях кратко изложено образование барьерной емкости, зависимость емкости от приложенного напряжения и метода формирования электронно-дырочного перехода. Объяснено формирование вольтамперной характеристики. Рассмотрены методы измерения зависимости емкости от приложенного напряжения. Приведены методика измерений, порядок выполнения лабораторной работы, контрольные вопросы и список рекомендуемой литературы.

Предназначено для студентов, изучающих курс «Физические основы микро- и нанoeлектроники».

Одобрено на заседании каф. КУДР, протокол № 234 от 5 марта 2022 г.

УДК 538.915  
ББК 22.35

© Славникова М.М., 2022  
© Артищев С.А., 2022  
© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

	Введение.....	4
1	Описание установки и методики измерения вольтамперной и вольтфарадной характеристик диода.....	4
2	Задание.....	12
3	Данные для расчета.....	12
4	Контрольные вопросы.....	12
	Список рекомендуемой литературы.....	13

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной электроники неразрывно связано с совершенствованием полупроводниковых приборов и поисками способов наиболее полного использования их характеристик. Основным компонентом большинства полупроводниковых приборов является электронно-дырочный или  $p-n$  переход (ЭДП), проводимость которого имеет активную и реактивную составляющие. Емкость ЭДП является основной частью практически всех схем на полупроводниковых приборах.

Полупроводниковый диод широко используют как управляемую напряжением емкость. Приборы, специально изготовленные для этой цели, называются варикапами. Области применения варикапов самые различные: параметрическое усиление слабых сигналов, электронная настройка колебательных контуров, амплитудная и частотная модуляция сигналов, умножение частоты и др.

Целью настоящей работы является исследование вольтфарадной и вольтамперной характеристик диода и установление связи их с технологическими параметрами ЭДП.

### 1 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ И ВОЛЬТФАРАДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИК ДИОДА

Зарядные емкости ЭДП обычно измеряют в режиме, когда к переходу приложено постоянное отрицательное напряжение. При положительном смещении измерение емкости трудно осуществить, т.к. она шунтируется большой активной проводимостью ЭДП.

Все существующие методы измерения емкости ЭДП основываются на предположении о том, что величина зарядной емкости не зависит от частоты вплоть до частот 100 ГГц, т.е. практически во всем диапазоне рабочих частот полупроводниковых приборов.

Таким образом, зарядная емкость в эквивалентной схеме замещения ЭДП считается независимым от частоты элементом. Это позволяет измерять емкость на любой удобной для измерения частоте.

Для измерения емкостей ЭДП используют три метода: метод замещения в резонансном контуре, мостовой метод, метод емкостно-омического делителя.

Метод замещения в резонансном контуре осуществляется следующим образом: перед измерением резонансный контур настраивается в резонанс, затем к контуру подключают измеряемый конденсатор и путем уменьшения емкости калиброванного конденсатора, включенного в контур, вновь добиваются резонанса. Изменение емкости калиброванного конденсатора равно измеряемой емкости. Этот метод применяется для измерения емкости конденсаторов с высокой добротностью. Недостатком метода является низкая производительность.

Мостовым методом измеряется полная проводимость образца. Измерения являются наиболее универсальными. Недостатком мостовых методов является низкая производительность, сложность измерений и высокая стоимость оборудования.

Широко применяемым на производстве является метод емкостно-омического делителя. Измерения осуществляются с помощью схемы, представленной на рисунке 1.1. Основными элементами этой схемы являются генератор напряжения высокой частоты, имеющий э.д.с.  $E$ , и активное внутреннее сопротивление генератора  $R_{ГН}$ , чувствительный селективный вольтметр, подключенный к измерительному сопротивлению  $R_{И}$  через разделительный конденсатор  $C_{Б}$ . Перед измерениями шкалу вольтметра калибруют с помощью эталонного конденсатора  $C_{ЭТ}$ , подключенного к зажимам для измерения емкости. Постоянное напряжение к ЭДП прикладывается от источника постоянного напряжения  $U$ .

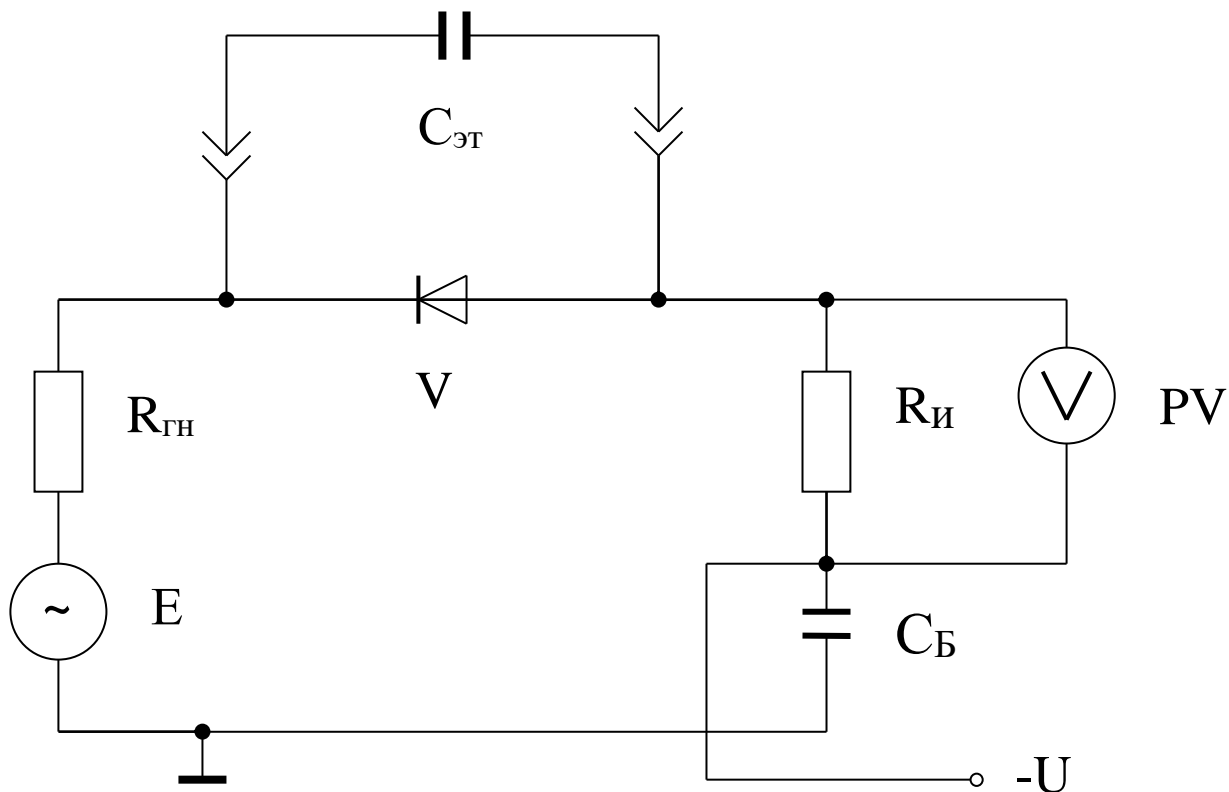


Рисунок 1.1 – Схема установки для измерения емкости методом емкостно-омического делителя

Элементы и рабочую схему выбирают так, чтобы были выполнены определенные условия. Амплитуда переменного сигнала, приложенного к ЭДП, не должна превышать 0,1 величины  $(U_0 - U)$ , где  $U_0$  – контактная разность потенциалов,  $U$  – постоянное напряжение, приложенное к ЭДП. Напряжение переменного сигнала почти полностью прикладывается к измеряемому диоду, поэтому должно выполняться условие:

$$R_{ГН} + R_{И} \ll \frac{1}{\omega C_{max}}, \quad (1.1)$$

где  $C_{max}$  – максимальная измеряемая емкость. При приложении высокочастотного напряжения к последовательной цепочке диод – измерительное сопротивление  $R_{И}$ , ток  $I$  в цепи будет определяться емкостным сопротивлением диода и будет пропорционален емкости диода:

$$I = E\omega C, \quad (1.2)$$

где  $E$  – напряжение генератора высокой частоты.

Напряжение на активном сопротивлении  $U$ , измеряемое селективным вольтметром, будет пропорционально току, протекающему через диод, т.е. емкости диода:

$$U = R_{II} E \omega C \quad , \quad (1.3)$$

Проградуировав шкалу вольтметра в значениях емкости, мы можем по показаниям прибора непосредственно определить емкость  $p-n$  перехода. По существу измерительная установка, изображенная на рисунке 1.1., измеряет не емкость, а модуль полной проводимости диода. Используемая градуировка показаний прибора в значениях емкости будет справедлива до тех пор, пока активная проводимость  $p-n$  перехода  $g$  меньше, чем емкостная проводимость. Для обеспечения погрешности менее 5 % достаточно выполнить условие:

$$g < \frac{1}{3} \omega C, \quad (1.4)$$

Чтобы выполнить это условие, необходимо выбрать частоту измерений достаточно высокой. Верхний предел частоты определяется тем, чтобы выполнялось неравенство  $\frac{1}{\omega C} > 3R_s$ , где  $R_s$  – сопротивление базы диода, т.е. емкостное сопротивление должно быть больше сопротивления базы диода, включенного последовательно с емкостью ЭДП. Базой диода называют полупроводниковую пластину, в которой формируется  $p-n$  переход, или слабо легированную область  $p-n$  перехода. Зависимость зарядной емкости от приложенного напряжения определяется распределением примесей. В связи с этим различают резкий и плавный  $p-n$  переходы. Если на границе раздела  $p$ - и  $n$ - областей градиент концентрации примеси равен бесконечности, то такой переход называется резким (рисунок 1.2).

При приложении напряжения к  $p-n$  переходу изменяется высота потенциального барьера  $p-n$  перехода и ширина области объемного заряда  $d$ .

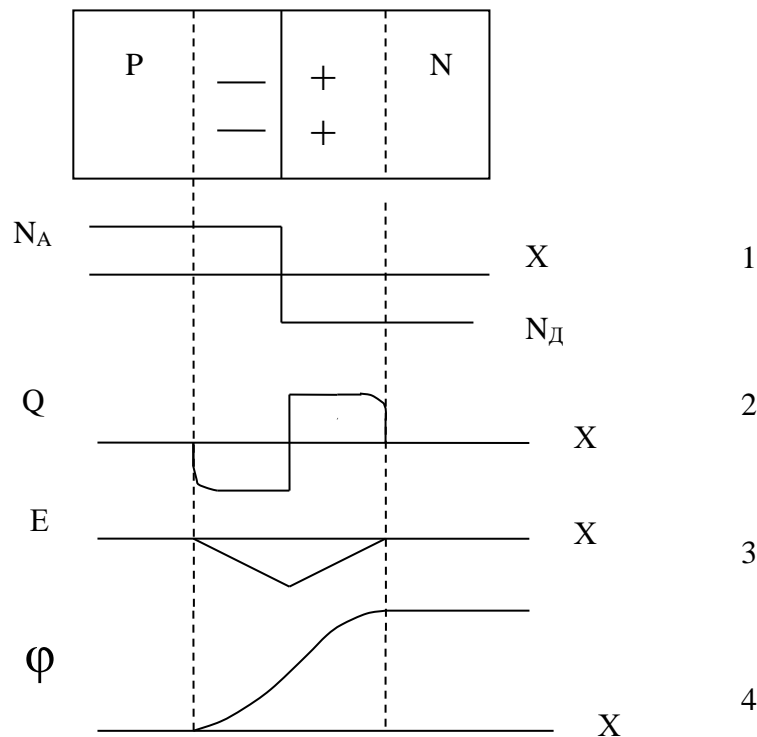


Рисунок 1.2 – Распределение концентрации примеси (1), плотности объемного заряда (2), электрического поля (3) и потенциала(4) для резкого электронно-дырочного перехода

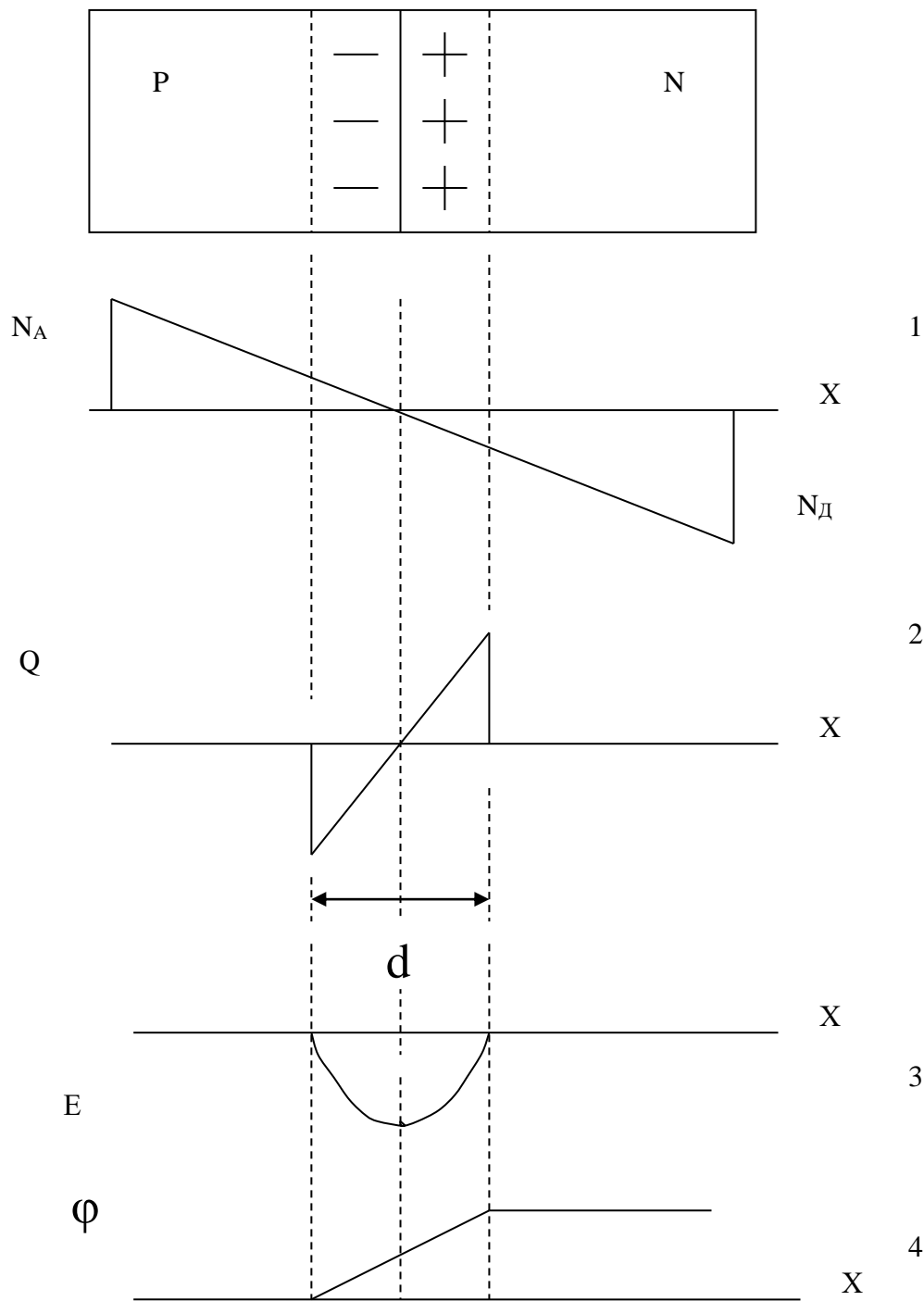


Рисунок 1.3 – Распределение концентрации примеси (1), плотности объемного заряда (2), напряженности электрического поля (3), потенциала (4) для плавного электронно-дырочного перехода

Связь между шириной области объемного заряда и приложенным напряжением определяется следующими соотношениями:

для резкого *p-n* перехода 
$$d = \left( \frac{2\epsilon\epsilon_0(u_0 - u)(N_a + N_d)}{eN_n N_d} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.5)$$

для плавного  $p-n$  перехода 
$$d = \left( \frac{12 \varepsilon \varepsilon_0 (u_0 - u)}{e a} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (1.6)$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника;

$\varepsilon_0$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума;

$u_0$  – контактная разность потенциалов;

$e$  – заряд электрона;

$N_a, N_d$  – концентрации акцепторов и доноров соответственно;

$a$  – градиент концентрации примеси.

Зарядную емкость  $C_n$  можно рассчитать как емкость плоского конденсатора

$$C_n = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}, \quad (1.7)$$

где  $S$  – площадь  $p-n$  перехода.

Для большинства резких  $p-n$  переходов имеем  $N_a \gg N_d$  или  $N_d \gg N_a$ . Учитывая это, зарядную емкость резкого  $p-n$  перехода можно записать следующим образом:

$$C_n = \left( \frac{\varepsilon \varepsilon_0 N}{2(u_0 - u)} \right)^{\frac{1}{2}} S, \quad (1.8)$$

где  $N$  – концентрация примесей в базе диода. Для зарядной емкости плавного  $p-n$  перехода справедливо выражение

$$C_n = \left( \frac{\varepsilon (\varepsilon \varepsilon_0)^2 a}{12(u_0 - u)} \right)^{\frac{1}{3}} S. \quad (1.9)$$

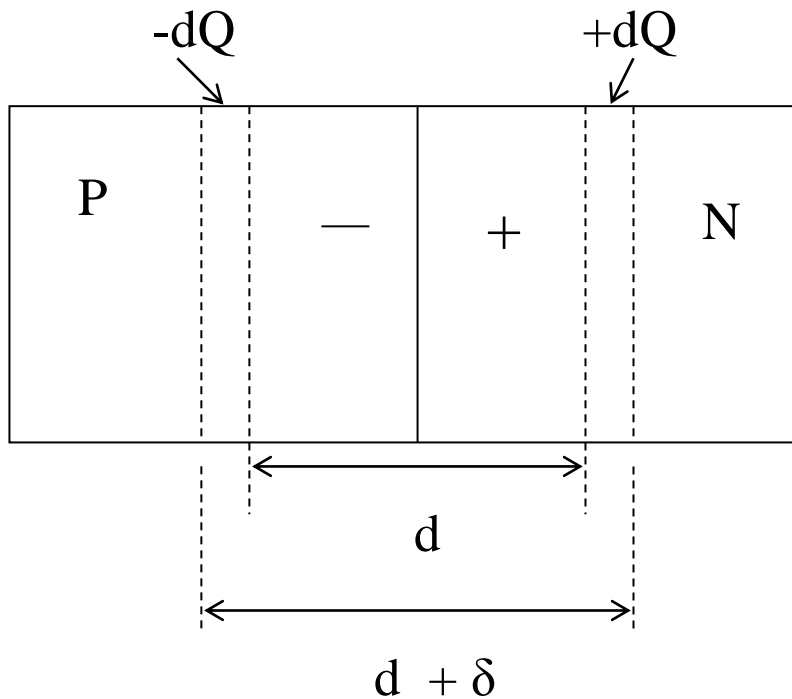


Рисунок 1.4 – Увеличение ширины области объемного заряда при приложении к  $p-n$  переходу обратного напряжения

Измерив вольтфарадную характеристику, можно определить некоторые конструктивные параметры диода. Если имеем резкий ЭДП, вольтфарадная характеристика



которого описывается выражением (1.8), то, построив функцию  $\left(\frac{S}{Cn}\right)^2$  в зависимости от напряжения, получим прямую линию вида

$$\left(\frac{S}{Cn}\right)^2 = \frac{2}{\epsilon\epsilon_0\epsilon_n N} (u_0 - u), \quad (1.10)$$

Из выражения (1.10) видно, что при  $u=u_0$  величина  $\left(\frac{S}{Cn}\right)^2 = 0$ .

Таким образом, по графику  $\left(\frac{S}{Cn}\right)^2$  можно определить значение  $u_0$ , а по наклону этой зависимости – концентрацию примеси в базе диода:

$$N = \frac{2}{\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{\Delta u}{\Delta\left(\frac{S}{Cn}\right)^2}. \quad (1.11)$$

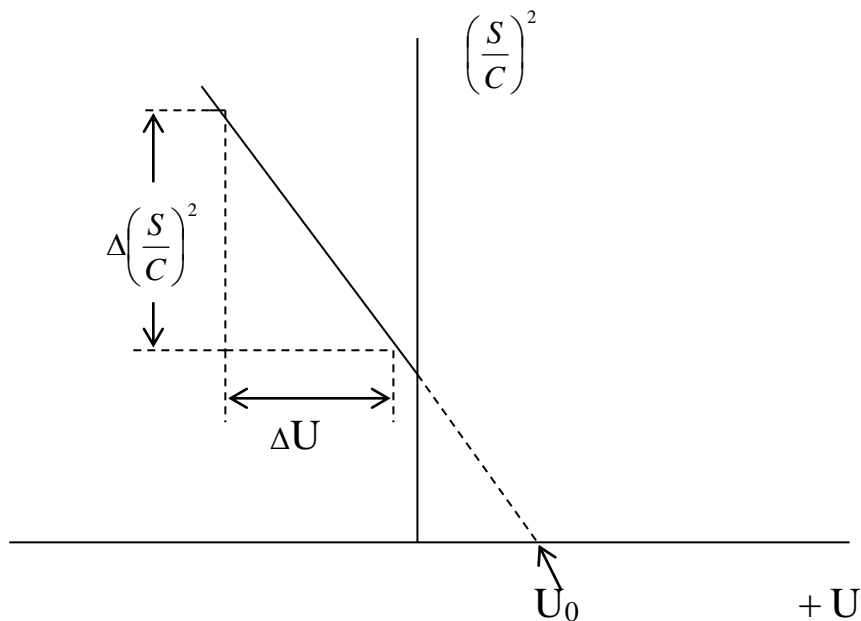


Рисунок 1.5 – Вольтфарадная характеристика резкого р-п перехода, построенная в координатах  $\left(\frac{S}{C}\right)^2 = f(U)$

Для плавного ЭДП, вольтфарадная характеристика которого описывается выражением (1.9), построив зависимость  $\left(\frac{S}{Cn}\right)^3$  от напряжения, получим прямую линию вида

$$\left(\frac{S}{Cn}\right)^3 = \frac{12}{\epsilon(\epsilon\epsilon_0)^2 \alpha} \cdot (u_0 - u). \quad (1.12)$$

Экстраполируя эту прямую до пересечения с осью напряжения, можно определить величину контактной разности потенциалов. Действительно, если  $\left(\frac{S}{Cn}\right)^3 = 0$ , то  $u=u_0$ . По наклону прямой (1.12) можно определить градиент концентрации примеси

$$\alpha = \frac{12}{\epsilon(\epsilon\epsilon_0)^2} \cdot \frac{\Delta u}{\Delta\left(\frac{S}{Cn}\right)^3}. \quad (1.13)$$

Вольтамперная характеристика диода описывается уравнением

$$I = I_0 \exp\left(\frac{u - IR_S}{kT}\right),$$

где  $I$  – ток, протекающий через диод;

$I_0$  – ток насыщения;  
 $u$  – напряжение, приложенное к диоду;  
 $R_S$  – объемное сопротивление базы диода;  
 $K$  – постоянная Больцмана;  
 $T$  – абсолютная температура.

Для измерения вольтамперной характеристики используется схема, представленная на рисунке 1.6.

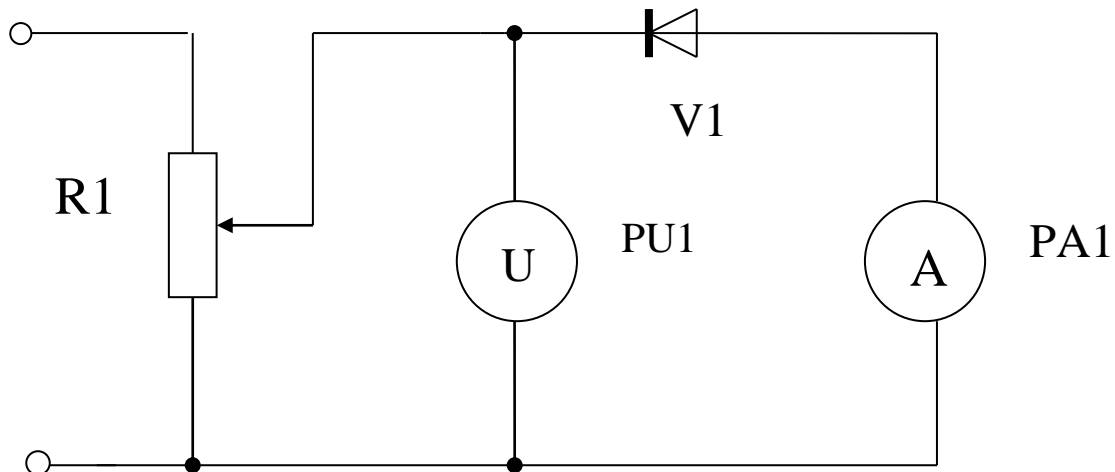


Рисунок 1.6 – Электрическая схема для измерения вольтамперной характеристики полупроводникового диода

При приложении к диоду напряжения в прямом направлении (на  $p$  область  $+$ , на  $n$  область  $-$ ), высота потенциального барьера уменьшается и, как следствие, увеличивается диффузионная компонента тока через  $p$ - $n$  переход, в результате чего сопротивление  $p$ - $n$  перехода уменьшается.

В общем случае сопротивление диода в прямом направлении будет определяться суммой сопротивления  $p$ - $n$  перехода и объемного сопротивления базы. При малых напряжениях, когда приложенное напряжение меньше контактной разности потенциалов  $u_0$ , сопротивление  $p$ - $n$  перехода много больше объемного сопротивления базы  $R_S$ , поэтому ток через диод экспоненциально зависит от приложенного напряжения. При прямом напряжении, превышающем контактную разность потенциалов, сопротивление  $p$ - $n$  перехода становится много меньше, чем сопротивление базы, и ток линейно зависит от напряжения. Переход от экспоненциальной зависимости тока от напряжения к линейной наблюдается на маломощных диодах при токах порядке 2-3 мА, для мощных – при 20-30 мА. Экстраполируя линейный участок вольтамперной характеристики на ось напряжения, как показано на рисунке 1.7, можно оценить контактную разность потенциалов, а по наклону линейного участка вольтамперной характеристики найти сопротивление базы  $R_S = \frac{\Delta u}{\Delta I}$ .

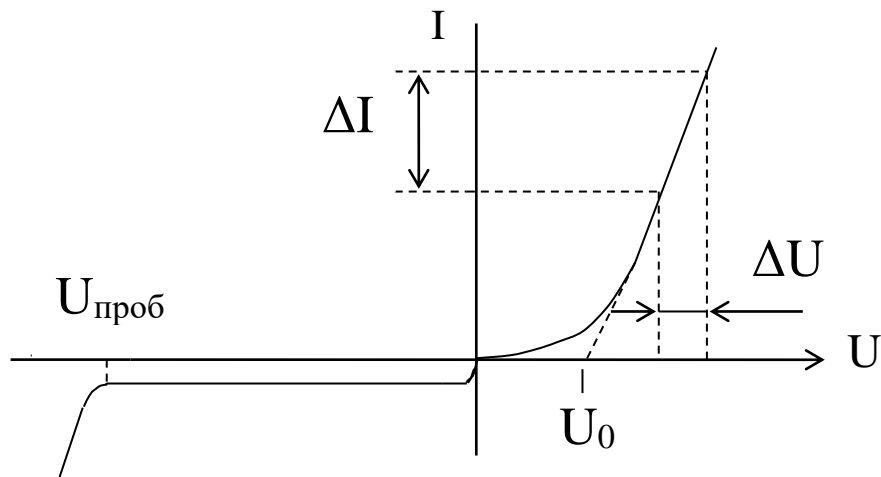


Рисунок 1.7 – Вольтамперная характеристика полупроводникового диода

Зная геометрические размеры базовой области и сопротивление  $R_s$ , можно определить удельное сопротивление базы

$$\rho = R_s \cdot \frac{S}{l}, \quad (1.14)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление базы диода;

$R_s$  – сопротивление базы диода;

$S$  – площадь  $p$ - $n$  перехода];

$l$  – ширина базы (толщина полупроводниковой пластины).

По величине удельного сопротивления полупроводника можно определить концентрацию примеси в базе диода:

$$N = \frac{1}{e\mu\rho}, \quad (1.15)$$

где  $N$  – концентрация примеси в базе диода;

$e$  – заряд электрона;

$\rho$  – удельное сопротивление базовой области;

$\mu$  – подвижность носителей заряда (в расчетах считать, что подвижность носителей заряда не зависит от концентрации примеси).

При приложении обратного напряжения высота потенциального барьера возрастает, и ток определяется дрейфовой компонентой, которая пропорциональна концентрации неосновных носителей заряда. При некотором напряжении наблюдается резкое увеличение обратного тока вследствие пробоя  $p$ - $n$  перехода. Под пробивным напряжением понимают такое напряжение, при котором обратный ток возрастает в 10 раз по сравнению с обратным током при рабочем напряжении. Максимальное обратное рабочее напряжение обычно составляет 0,7-0,8 от пробивного напряжения. Зная величину пробивного напряжения по эмпирическим соотношениям (см. ниже) можно оценить концентрацию примеси в базе резкого  $p$ - $n$  перехода, а для плавного  $p$ - $n$  перехода – рассчитать градиент концентрации примеси.

Для германия: резкий  $p^+$ - $n$  переход:  $U_{проб} = 100\rho^{0,8}$ ;

резкий  $p$ - $n^+$  переход:  $U_{проб} = 55\rho^{0,8}$ ;

плавный  $p$ - $n$  переход:  $U_{проб} = 4,46 \cdot 10^{10} \cdot \alpha^{-0,45}$ .

Для кремния: резкий  $p^+$ - $n$  переход:  $U_{проб} = 96\rho^{0,78}$ ;

резкий  $p$ - $n^+$  переход:  $U_{проб} = 48\rho^{0,78}$ ;

плавный  $p$ - $n$  переход:  $U_{проб} = 4,57 \cdot 10^8 \cdot \alpha^{-0,3}$ ,

где  $\rho$  – сопротивление базы диода, Ом·см;

$a$  – градиент концентрации примеси в  $p$ - $n$  переходе, см<sup>-4</sup>.

Для исследования диода используется лабораторный макет, принципиальная схема которого приведена на рисунке 1.1.

Исследуемый диод подключается к гнездам. Полярность подключения обозначена на макете. Режим работы выбирается переключателем: "С" – исследование вольтфарадной характеристики; «*Inp*» – исследование прямой вольтамперной характеристики; «*Обр*» – исследование обратной вольтамперной характеристики; регулировка напряжения производится ручкой «*U*». Отсчет значений емкости, прямого тока и обратного тока осуществляется по прибору отсчета параметров.

Перед началом измерений вольтфарадной характеристики необходимо провести калибровку прибора. Для этого в режиме измерений вольтфарадной характеристики в гнезда макета вместо исследуемого образца включается эталонный конденсатор емкостью 500 пФ, ручкой КАЛИБРОВКА стрелку измерителя параметров устанавливают в положение 500 пФ. После этого прибор готов к измерениям.

## 2 ЗАДАНИЕ

2.1. Измерить вольтфарадную характеристику  $p$ - $n$  перехода при подаче обратного напряжения.

2.2. Измерить прямую вольтамперную характеристику диода.

2.3. Измерить обратную вольтамперную характеристику, изменяя напряжение от 0 до пробивного напряжения.

2.4. Построить функции  $\left(\frac{s}{c_n}\right)^2$  и  $\left(\frac{s}{c_n}\right)^3$  в зависимости от обратного напряжения и определить характер распределения примеси в  $p$ - $n$  переходе.

2.5. Построить вольтамперную характеристику.

2.6. Определить контактную разность потенциалов по вольтамперной и вольтфарадной характеристикам и сравнить полученные результаты.

2.7. Для резкого  $p$ - $n$  перехода рассчитать концентрацию примеси в базе диода по вольтфарадной, вольтамперной характеристикам и пробивному напряжению.

Для плавного  $p$ - $n$  перехода по вольтамперной характеристике рассчитать концентрацию примеси в базе, по вольтфарадной характеристике и пробивному напряжению рассчитать градиент концентрации примеси в  $p$ - $n$  переходе. Полученные результаты сравнить и объяснить их расхождение.

## 3 ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

3.1. Площадь  $p$ - $n$  перехода 0,2 мм<sup>2</sup>.

3.2. Ширина базы 0,2 мм.

3.3. Относительная диэлектрическая проницаемость: германия – 16,3; кремния – 11,2.

3.4. Диэлектрическая проницаемость вакуума:  $8,86 \cdot 10^{-12}$  Ф/м =  $8,86 \cdot 10^{-14}$  Ф/см.

3.5. Постоянная Больцмана:  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К =  $0,86 \cdot 10^{-4}$  эВ/ К.

3.6. Заряд электрона:  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл

3.7. Подвижность носителей заряда в кремнии: дырок – 470 см<sup>2</sup>/(В·с); электронов – 1300 см<sup>2</sup>/(В·с); в германии: дырок – 1820 см<sup>2</sup>/(В·с); электронов – 3800 см<sup>2</sup>/(В·с).

## 4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

4.1. Объясните природу зарядной емкости.

- 4.2. Как по вольтфарадной характеристике определить контактную разность потенциалов?
- 4.3. Объясните влияние распределения примеси на вольтфарадную характеристику.
- 4.4. Как по вольтфарадной характеристике определить тип  $p-n$  перехода (резкий или плавный)?
- 4.5. Объясните, почему пробивное напряжение для резкого  $p-n$  перехода зависит от концентрации примеси, а для плавного - от градиента концентрации.
- 4.6. Поясните, что такое «база» диода.
- 4.7. Как по вольтамперной характеристике определить сопротивление базы?
- 4.8. Как можно рассчитать концентрацию примеси в базе диода?

#### СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы. С.-Пб.: Лань, 2003. -350 с.
2. Федотов А.Я. Основы физики полупроводниковых приборов. М.: Сов. радио, 1969, - 591 с.
3. Берман Л.С. Нелинейная полупроводниковая емкость. М.: Физматгиз, 1963. – 86 с.
4. Аронов В.Л., Федотов А.Я. Испытание и исследование полупроводниковых приборов. М.: Высшая школа, 1975,- 253 с.
5. Гаман В.И. Физика полупроводниковых приборов: Учебное пособие. Томск: Изд-во НТЛ, 2000. – 426с.: ил.