

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна

Должность: проректор по учебной работе

Дата подписания: 27.01.2022 22:42:58

Уникальный программный ключ:

0b817ca911e6668abb13a5d426d31e51fc11eabb175e9745d14a48911da36d089

## МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и систем связи

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова

« 15 »

2017 г.



### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА СИЛЬНОГО ПОЛЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Методические указания по выполнению лабораторной работы  
для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.03.02

Курск 2017

УДК 681.5

Составитель А.А. Гримов

Рецензент

Доктор технических наук, профессор А.Ф. Рыбочкин

**Исследование эффекта сильного поля в полупроводниках:** методические указания по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Физические основы электроники» / Юго-Зап. гос. ун-т.; сост.: А. А. Гримов. Курск, 2017. 11 с.: ил. 8, Библиогр.: с.11.

Содержатся методические рекомендации по экспериментальному исследованию эффекта сильного поля в диодах Ганна. Указывается порядок выполнения лабораторной работы.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать \_\_\_\_\_ . Формат 60×84 1/16.  
Усл. печ. л. \_\_\_\_ . Уч.-изд. л. \_\_\_\_ . Тираж 100 экз. Заказ \_\_\_\_ . Бесплатно.  
Юго-Западный государственный университет.  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить особенности эффекта сильного поля в полупроводниках на основе арсенида галлия.

## 2. ВОЛЬТ-АМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИОДА ГАННА

В 1963 г. Ганн обнаружил, что в бруске арсенида галлия (GaAs) при приложении к нему постоянного напряжения определенной величины возникают периодические колебания протекающего тока. Период колебаний приближенно равнялся времени пролета электронов через образец и соответствовал частоте СВЧ диапазона. Это открытие привело к созданию перспективного полупроводникового СВЧ генератора на диоде Ганна.

Диод Ганна представляет собой образец полупроводника (обычно GaAs), на противоположные торцы которого нанесены омические контакты: анод, катод (рис.2.1).



Рис.2.1. Схематическое изображение диода Ганна

Структура энергетических зон арсенида галлия показана на рис.2.2. В зоне проводимости имеются два минимума, эффективные массы электронов в которых существенно различаются. Действительно, по определению эффективная масса

$$m^* = \frac{\hbar^2}{d^2E/dk^2}, \quad (2.1)$$

где  $\hbar$  - приведенная постоянная Планка;  $\frac{d^2E}{dk^2}$  - кривизна зависимости  $E(k)$ .

Так как кривизна нижнего минимума больше, чем верхнего, то из выражения (2.1) следует, что  $m_1^* < m_2^*$ . Тогда в соответствии с формулой

$$\mu = \frac{q}{m_n} \cdot \tau, \quad (2.2)$$

где  $\mu$  - подвижность;  $\tau$  - время реакции носителей заряда, подвижность легких электронов в первом минимуме будет выше, чем тяжелых во втором. Обычно в арсениде галлия  $m_1^* = 0,072 m_0$ ,  $m_2^* = 1,2 m_0$ ,  $\mu_1 = (5-8) \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ,  $\mu_2 = 100 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  ( $m_0$  - масса свободного электрона).

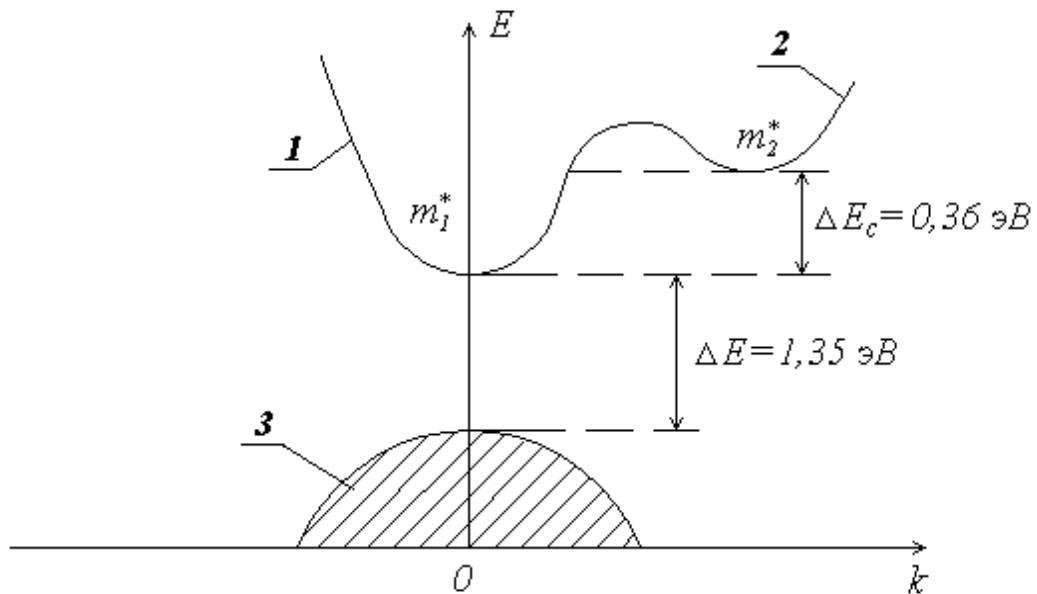


Рис.2.2. Структура энергетических зон в арсениде галлия n-типа:

**1** - нижний минимум зоны проводимости; **2** - верхний минимум зоны проводимости; **3** - валентная зона;  $E$  - энергия электрона;  $k$  - волновое число;  $m_1^*$  - эффективная масса электрона в минимуме 1;  $m_2^*$  - эффективная масса электрона в минимуме 2

При малой напряженности электрического поля в полупроводнике все свободные электроны находятся в минимуме 1 (рис.2.3,а), и плотность тока через диод линейно увеличивается с ростом напряженности электрического поля (рис.2.4, область 1)

$$j = q \cdot \mu \cdot n_0 \cdot E, \quad (2.3)$$

где  $q$  - заряд электрона;  $n_0$  - концентрация свободных электронов в полупроводнике.

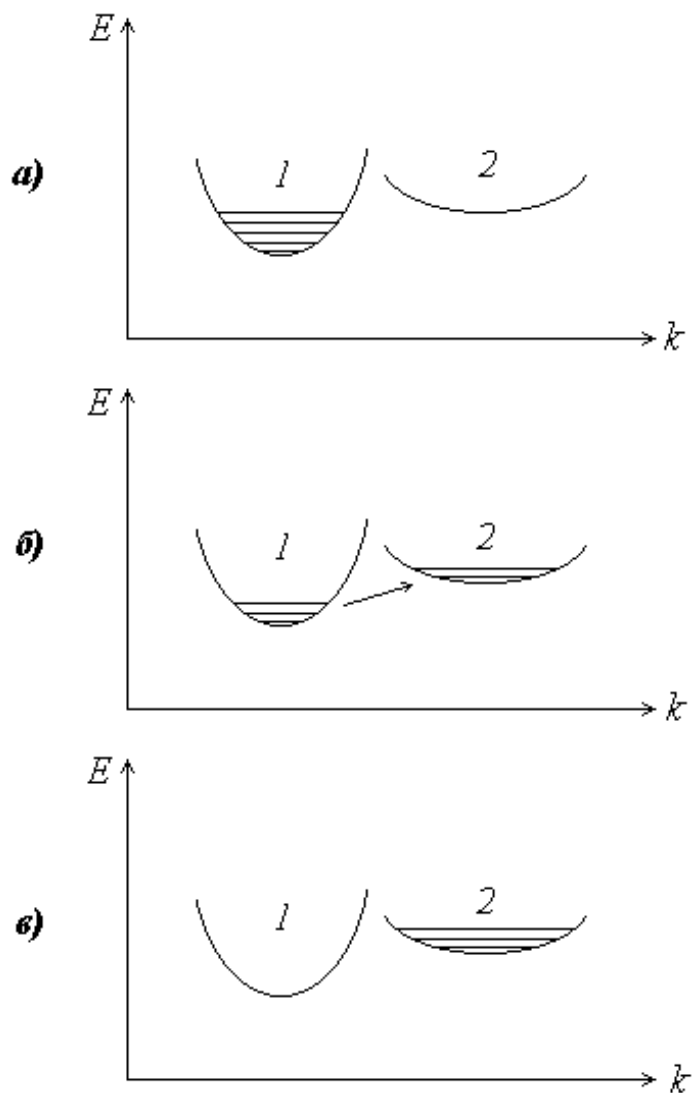


Рис.2.3. Распределение электронов при различных напряженностях электрического поля: **а)**  $E < E_{пор}$ , **б)**  $E_{пор} < E < E_0$ , **в)**  $E > E_0$

При напряженности электрического поля  $E_{пор}$  некоторые свободные электроны будут иметь энергию  $\Delta E_c$  (см.рис.2.2), достаточную для их перехода из нижнего минимума в верхний (см.рис.2.3,б). Напряженность поля  $E_{пор}$ , при которой начинаются такие переходы, называют пороговой. Уменьшение подвижности электронов, перешедших в верхний минимум, вызывает замедление роста тока при повышении напряженности электрического поля, а затем и спад (см.рис.2.4, область 2).

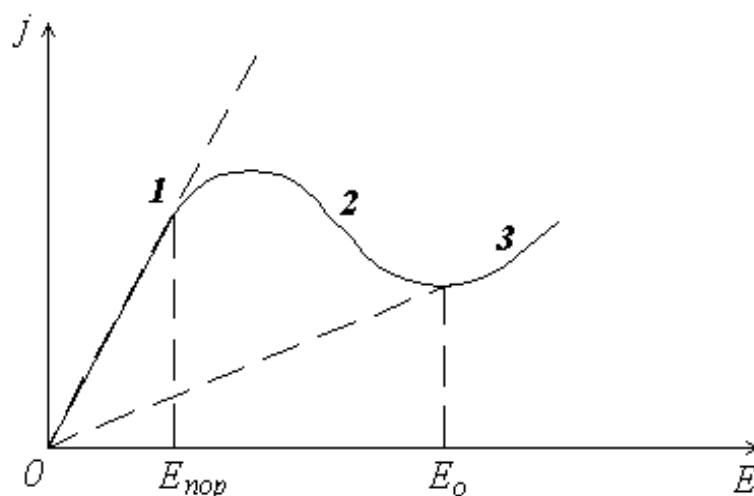


Рис.2.4. Зависимость плотности тока от напряженности электрического поля: **1** -  $j = q\mu_1 n_0 E$ , **2** -  $j = q\mu_1 n_1 E + q\mu_2 n_2 E$ , **3** -  $j = q\mu_2 n_0 E$

Вольт-амперная характеристика в этом случае описывается выражением

$$j = q\mu_1 n_1 E + q\mu_2 n_2 E, \quad (2.4)$$

где  $n_1$  - концентрация электронов в нижнем минимуме;  $n_2$  - концентрация электронов в верхнем минимуме.

В процессе перехода электронов из первого минимума во второй величина  $n_1$  уменьшается, а  $n_2$  возрастает, так что количество свободных носителей заряда в полупроводнике при этом остается постоянным

$$n_0 = n_1 + n_2. \quad (2.5)$$

При напряженности электрического поля  $E_0$  все свободные электроны перейдут в минимум 2 (см.рис.2.3, в), и при дальнейшем повышении напряженности плотность тока будет снова возрастать линейно (см.рис.2.4, область 3)

$$j = q\mu_2 n_0 E. \quad (2.6)$$

Однако, так как  $\mu_2 < \mu_1$ , наклон зависимости  $j(E)$  в области 1 (см.рис.2.4) будет меньше, чем в области 3.

Выражение (2.4) можно записать в виде

$$j = qn_0 \frac{(\mu_1 n_1 + \mu_2 n_2)}{n_0} E = qn_0 \mu_{\text{эф}} E, \quad (2.7)$$

где

$$\mu_{\text{эф}} = \frac{\mu_1 n_1 + \mu_2 n_2}{n_0}. \quad (2.8)$$

Эффективная подвижность электронов ( $\mu_{\text{эф}}$ ) зависит от напряженности электрического поля. Вид зависимости  $\mu_{\text{эф}}(E)$  представлен на рис.2.5.

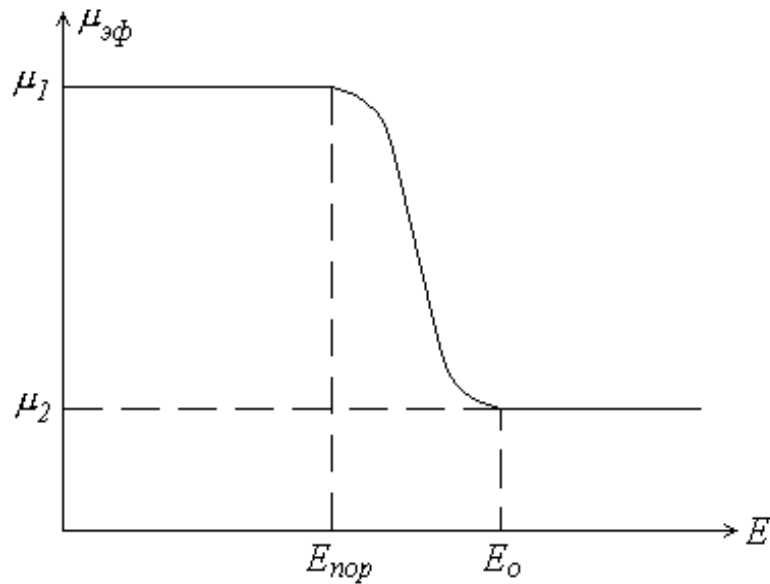


Рис.2.5. Зависимость эффективной подвижности электронов от напряженности электрического поля

### 3. ДОМЕННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ

Полупроводниковые материалы обычно неоднородны по удельному сопротивлению. Пусть в образце на расстоянии  $x_0$  от катода (рис.3.1,а) существует область повышенного сопротивления шириной  $\Delta x$ . Напряженность электрического поля в этой области будет выше, чем в других частях образца (рис.3.1,б, кривая 1), и именно здесь, в первую очередь, она достигает значения  $E_{\text{нор}}$  при постепенном увеличении внешнего напряжения.

Вследствие снижения подвижности при  $E > E_{\text{нор}}$  электроны в слое  $\Delta x$  медленно перемещаются к аноду. Скорость их дрейфа  $V_{d_2} = \mu_2 E$ . Справа и слева от области  $\Delta x$  с более высокой скоростью  $V_{d_1} = \mu_1 E$  дрейфуют электроны с эффективной массой  $m_1^*$ . Легкие электроны слева от слоя  $\Delta x$  дого-

няет зону тяжелых электронов, а справа уходят вперед. В результате на участке от  $x_1$  до  $x_2$  (рис.3.1,в) создается отрицательно заряженный слой с повышенной концентрацией электронов и примыкающий к нему положительно заряженный обедненный слой. Эта область двойного заряда называется доменом.

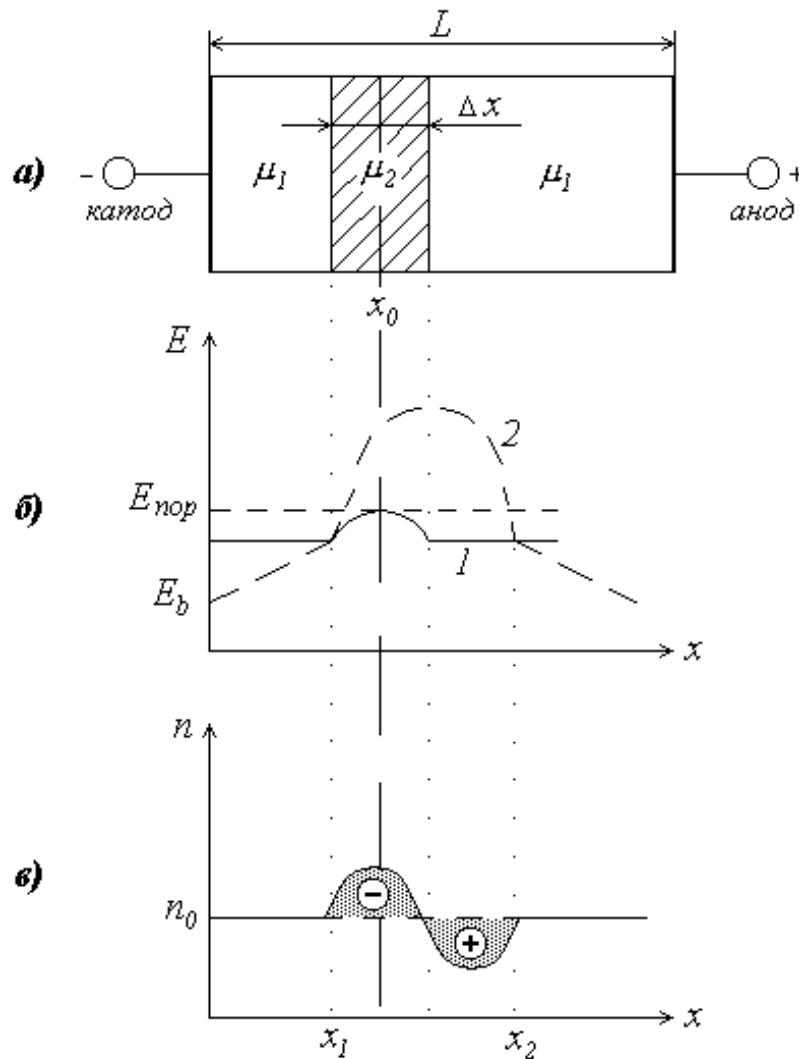


Рис.3.1. Схема диода Ганна (а), распределение напряженности электрического поля (б) и концентрации электронов (в) при образовании домена

Возникновение домена сопровождается перераспределением электрического поля. Рост сопротивления приводит к повышению напряженности электрического поля в области домена, тогда как на остальной части образца поле снижается (рис.3.1,б, кривая 2). Это приводит к выравниванию скоростей движения электронов внутри домена и вне его, то есть



$$\mu_1 E_b = \mu_2 E_d, \quad (3.1)$$

где  $E_d$ ,  $E_b$  - напряженность электрического поля в домене и вне его. Установившаяся скорость движения домена ( $V_d$ ) будет ниже, чем максимальная скорость дрейфа электронов в образце.

Таким образом, в момент включения внешнего напряжения (рис.3.2,  $t = t_0$ ) ток через образец равен  $j_{max}$ .

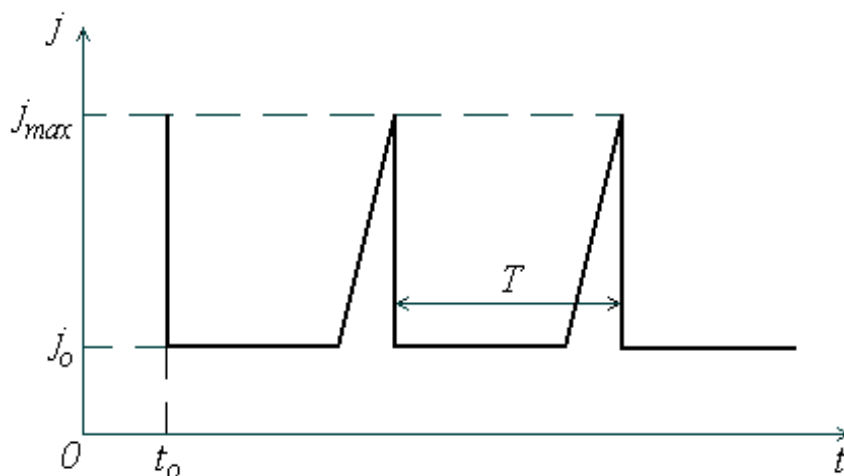


Рис.3.2. Колебания тока, протекающего через диод Ганна

Домен обычно возникает у катода, где имеется высокоомный приконтактный слой. Время формирования домена очень мало (меньше  $10^{-12}$  с). Поэтому ток через образец уменьшается практически мгновенно, напряженность электрического поля вне домена ( $E_b$ ) меньше пороговой величины (см.рис.3.1,б), поэтому второй домен образоваться не может. В течение времени  $T = L/V_d$  домен дрейфует к аноду, и ток через образец не изменяется ( $j = j_0$ ). На аноде домен разрушается, ток в цепи возрастает до величины  $j_{max}$ , а напряженность электрического поля - от  $E_b$  до  $E_{пор}$  (см.рис.3.1,б, кривая 1). У катода образуется новый домен и цикл повторяется. Частота колебаний тока зависит от длины образца и при  $L=10$  мкм достигает  $10$  ГГц.

#### 4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

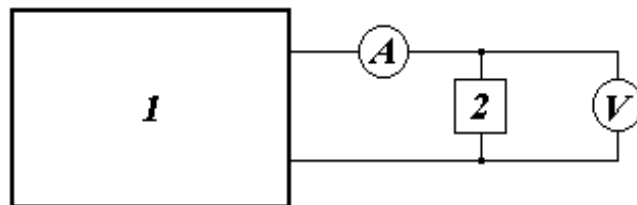
1. Работа выполняется на стенде ЛР № 5. В работе используется диод Ганна типа **3A719A**.

2. Снять вольт-амперную характеристику предлагаемого диода Ганна и построить график  $I=f(U)$ .

3. Рассчитать пороговую напряженность электрического поля (см.рис.2.4). Длина образца  $L=1,3 \cdot 10^{-3}$  см.

4. Оценить максимальную плотность тока через диод. Радиус поперечного сечения образца принять равным  $7,5 \cdot 10^{-3}$  см.

5. Рассчитать статическую проводимость диода ( $\sigma_{cm}$ ) для всех измеренных точек вольт-амперной характеристики.



**Рис.4.1.** Схема измерения вольт-амперной характеристики диода Ганна: **1** - источник напряжения; **2** - исследуемый диод

6. Рассчитать и построить зависимость эффективной подвижности электронов от напряжением на диоде.

$$\mu_{эф} = \mu_1 \frac{\sigma_{cm}}{\sigma_0}, \quad (4.1)$$

где  $\sigma_0$  - проводимость диода на участке выполнения закона Ома (см.рис.4,  $E < E_{пор}$ ). Величину  $\mu_1$  принять равной  $4500$  см<sup>2</sup>/В·с.

7. Оценить максимальную величину отрицательного дифференциального сопротивления  $R_{диф}$  диода

$$R_{диф} = \frac{\Delta U}{\Delta J}, \quad (4.2)$$

где  $\Delta U$  - приращение напряжения;  $\Delta I$  - соответствующее приращение тока.

8. Рассчитать максимальное изменение подвижности. ( Теоретически  $\left( \frac{\mu_1}{\mu_{\text{эф}}} \right)_{\text{max}} = \frac{m_2^*}{m_1^*} \cong 17$  ).

9. Сделать выводы по работе.

## 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему в сильных электрических полях электропроводность арсенида галлия может уменьшиться ?
2. Объясните вольт-амперную характеристику диода Ганна.
3. Что такое эффективная подвижность ?
4. Объясните процесс образования домена.
5. Объясните природу СВЧ колебаний тока в диоде Ганна.
6. Почему колебания тока наблюдаются при напряженности электрического поля выше порогового значения ?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Епифанов Г.Н. Физические основы микроэлектроники. М.: Советское радио, 1971. 375 с.
2. Епифанов Г.Н. Физика твердого тела. М.: Высшая школа, 1977. 288с.
3. Дулин В.Н. Электронные приборы. М.: Энергия, 1977. 424 с.
4. Смит З. Полупроводники. М.: Мир, 1982. 560 с.
5. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника. М.: Высшая школа, 1991. 351 с.
6. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. - М.: Сов.радио, 1980. 347 с.

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и систем связи

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова

« 15 »

2017 г.



**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ И ВОЛЬТФАРАДНЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ**

Методические указания по выполнению лабораторной работы  
для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.03.02

Курск 2017

УДК 681.5

Составитель А.А. Гримов

Рецензент

Доктор технических наук, профессор А.Ф. Рыбочкин

**Исследование вольтамперных и вольтфарадных характеристик полупроводниковых диодов:** методические указания по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Физические основы электроники» / Юго-Зап. гос. ун-т.; сост.: А. А. Гримов. Курск, 2017. 12 с.: ил. 7, Библиогр.: с. 12.

Содержатся методические рекомендации по экспериментальному исследованию вольтамперных и вольтфарадных характеристик полупроводниковых диодов и определению основных параметров полупроводников. Указывается порядок выполнения лабораторной работы.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать \_\_\_\_\_ . Формат 60×84 1/16.  
Усл. печ. л. \_\_\_\_ . Уч.-изд. л. \_\_\_\_ . Тираж 100 экз. Заказ \_\_\_\_ . Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной электроники связано с совершенствованием полупроводниковых приборов и поисками способов наиболее полного использования их характеристик. Основным компонентом большинства полупроводниковых приборов является р-п-переход, проводимость которого имеет активную и реактивную составляющие. Емкость р-п-переходов является основной частью практически всех эквивалентных схем полупроводниковых приборов.

Полупроводниковый диод широко используют как электронно-управляемую емкость. Приборы, изготовленные для этой цели, получили название варикапов. Области применения варикапов самые различные: параметрическое усиление слабых сигналов, электронная настройка контуров, амплитудная и частотная модуляция сигналов, умножение частоты и т.д.

Целью настоящей работы является исследование вольтфарадной и вольтамперной характеристик диода и установления их связи с технологическими параметрами р-п-перехода.

## 2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ВОЛЬАМПЕРНОЙ И ВОЛЬТФАРАДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИК

Зарядные емкости р-п-переходов обычно измеряют при приложении к переходу постоянного обратного напряжения. При прямом смещении измерение емкости затруднено, так как она зашунтирована большой активной проводимостью.

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

Таким образом, зарядная емкость в эквивалентной схеме замещения р-п-перехода считается независимым от частоты элементом. Это позволяет измерять емкость на любой частоте.

Для измерения емкостей р-п-переходов используют три метода: метод замещения в резонансном контуре, мостовой метод, метод емкостно-резистивного делителя.

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

Мостовым методом, являющимся наиболее универсальным, измеряется полная проводимость образца. Недостатком его является низкая производительность, сложность измерений и дороговизна оборудования.

Широко применяемым на производстве является метод емкостно-резистивного делителя. Измерение осуществляется с помощью схемы, помещенной на рисунке 2.1. Основными элементами ее являются генератор напряжения высокой частоты, имеющий ЭДС  $E$  и активное внутреннее сопротивление  $R_{гн}$ , чувствительный селективный вольтметр, подключенный к измерительному сопротивлению  $R_{и}$  через разделительный конденсатор  $C_{б}$ . Перед измерениями схему калибруют с помощью эталонного конденсатора  $C_{эт}$ , подключенного к зажимам для измерения емкости. Постоянное напряжение к р-п-переходу прикладывается от источника постоянного напряжения  $U_{см}$ .

Элементы и рабочую схему выбирают так, чтобы были выполнены определенные условия. Амплитуда переменного сигнала, приложенного к р-п-переходу, не должна превышать 0,1 величины  $(\phi_k - U_{см})$ , где  $\phi_k$  – контактная разность потенциалов,  $U_{см}$  – постоянное напряжение, приложенное к р-п-переходу. Напряжение переменного сигнала почти полностью прикладывается к измеряемому диоду, то есть должно выполняться условие:

$$R_{гн} + R_{и} \ll \frac{1}{\omega C_{макс}} \quad (2.1)$$

где  $C_{макс}$  – максимальная измеряемая емкость.

При приложении высокочастотного напряжения к последовательной цепочке диод – измерительное сопротивление  $R_{и}$ , ток в цепи будет определяться емкостным сопротивлением диода и будет пропорционален емкости диода:

$$I = E\omega c \quad (2.2)$$

где  $E$  – напряжение генератора высокой частоты.

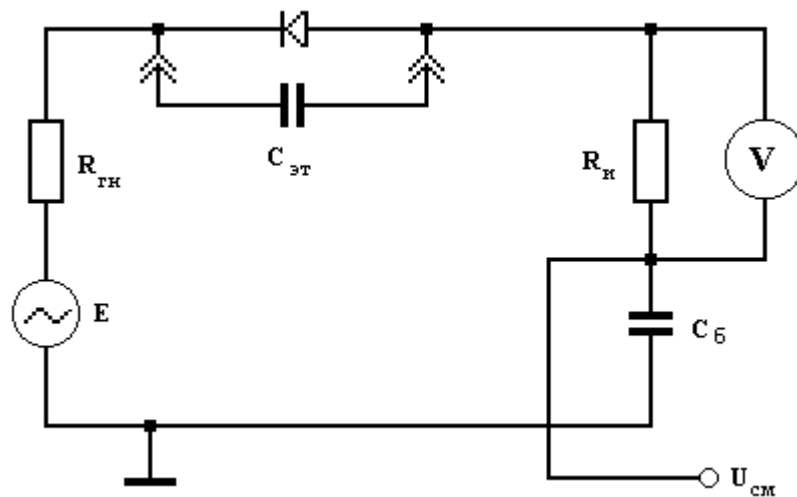


Рис. 2.1. Схема измерения емкости методом емкостно-резистивного делителя

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

$$U = R_{\text{и}} E \omega c \quad (2.3)$$

Проградуировав шкалу вольтметра, мы можем по показаниям прибора непосредственно определить емкость р-п-перехода. По существу измерительная установка, изображенная на рис. 2.1, измеряет не емкость, а модуль полной проводимости. Используемая градуировка показаний прибора в значениях емкости будет справедлива до тех пор, пока активная проводимость р-п-перехода  $g$  меньше, чем емкостная проводимость. Для обеспечения погрешности менее 5% достаточно выполнить условие:

$$g < \frac{1}{3} \omega c \quad (2.4)$$

Чтобы выполнить это условие, необходимо выбрать частоту измерений достаточно высокой. Верхний предел частоты определяется тем, чтобы выполнялось условие  $1/\omega c > 3r_s$ , где  $r_s$  – сопротивление базы диода (базой диода называют полупроводниковую пластину, в которой формируется р-п-переход, или слабо легированную область диода). Функциональная зависимость зарядной емкости от приложенного обратного напряжения определяется характером распределения примесей в р-п-переходе. В связи с этим различают резкий и плавный р-п-переходы. Если на границе р- и п- областей градиент концентрации равен бесконечности (концентрация меняется от некоторой концентрации акцепторов в р-типе до некоторой концентрации доноров в п-типе), то такой переход называется резким (рис. 2.2,а). Если концентрация меняется линейно, то такой переход называется плавным (рис. 2.2,б). При приложении напряжения к р-п-переходу изменяется высота потенциального барьера р-п-перехода и ширина области объемного заряда ( $d$ ). Связь между шириной области объемного заряда и приложенным напряжением определяется следующими соотношениями:

$$\text{для резкого р-п-перехода } d = \left[ \frac{2\epsilon \epsilon_0 (\varphi_k - U) (N_a - N_d)}{e N_a N_d} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.5)$$

$$\text{для плавного р-п-перехода } d = \left[ \frac{12\epsilon \epsilon_0 (\varphi_k - U)}{e \alpha} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.6)$$

где  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника;  
 $\epsilon_0$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума;  
 $\varphi_k$  – контактная разность потенциалов;  
 $e$  – заряд электрона;  
 $N_a, N_d$  – концентрация акцепторов и доноров, соответственно;  
 $\alpha$  – градиент концентрации примесей.



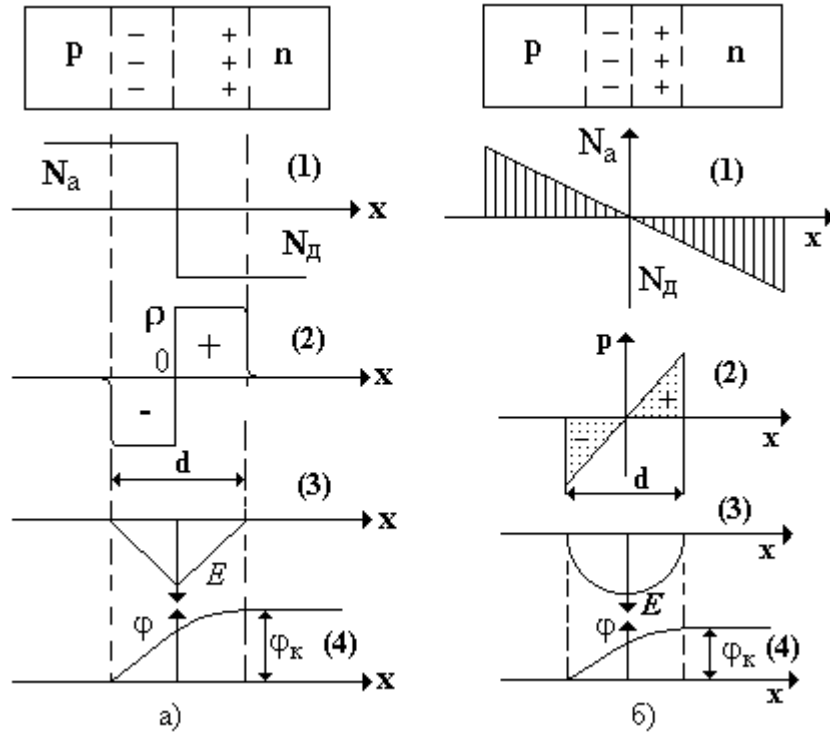


Рис. 2.2. Распределение концентрации примесей (1), плотности объемного заряда (2), электрического поля (3), потенциала (4) для резкого (а) и плавного (б) р-п-перехода

Если постоянное напряжение, приложенное к р-п-переходу, изменить на малую величину  $dU \ll (\varphi_k - U)$ , то ширина области объемного заряда изменится на величину  $\delta \ll d$  (рис. 2.3). При этом на границах области объемного заряда будет накапливаться дополнительный объемный заряд  $-dQ$  в р-типе и  $+dQ$  в п-типе. Поскольку  $\delta \ll d$ , то можно считать, что дополнительный заряд накапливается на поверхностях, удаленных друг от друга на расстояние  $d$ . Зарядную емкость можно рассчитать как емкость плоского конденсатора

$$C_{\text{зар}} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}, \quad (2.7)$$

где  $S$  – площадь р-п-перехода.

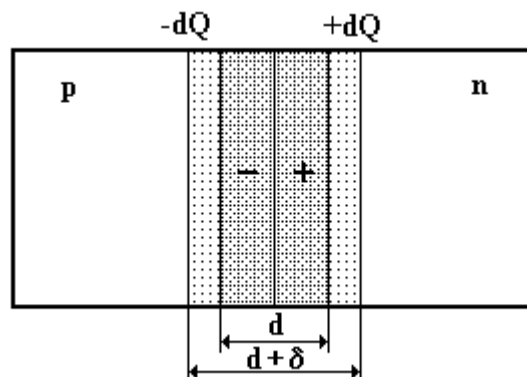


Рис. 2.3. Изменение ширины области заряда

Для большинства резких p-n-переходов мы имеем  $N_a \gg N_d$  или  $N_d \gg N_a$ . Учитывая это, зарядная емкость резкого p-n-перехода будет равна

$$C_{\text{зар}} = S \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0 N}{2(\phi_{\text{к}} - U)}}, \quad (2.8)$$

где  $N$  – концентрация примесей в базе диода.

Зарядная емкость плавного p-n-перехода имеет выражение

$$C_{\text{зар}} = S^3 \sqrt{\frac{\epsilon(\epsilon \epsilon_0)^2 \alpha}{12(\phi_{\text{к}} - U)}}, \quad (2.9)$$

Измерив вольтфарадную характеристику, можно определить некоторые конструктивные параметры диода. Для резкого p-n-перехода, вольтфарадная характеристика которого описывается выражением (2.8), построив функцию  $(S/C)^2$  в зависимости от напряжения (рис. 2.4), получим линейную зависимость вида

$$\left(\frac{S}{C}\right)^2 = \frac{2}{\epsilon \epsilon_0 N} (\phi_{\text{к}} - U) \quad (2.10)$$

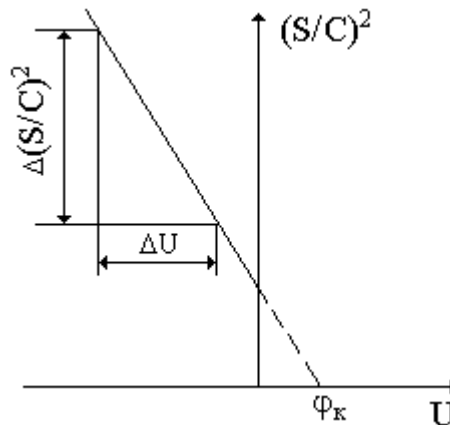


Рис. 2.4. Зависимость  $(S/C)^2$  от приложенного напряжения для резкого p-n-перехода

Из выражения (2.10) видно, что при  $U = \phi_{\text{к}}$  величина  $(S/C)^2 = 0$ . Таким образом, по графику легко определить значение  $\phi_{\text{к}}$ , а из наклона – концентрацию примесей:

$$N = \frac{2}{\epsilon \epsilon_0} \cdot \frac{\Delta U}{\Delta \left(\frac{S}{C}\right)^2} \quad (2.11)$$

Для плавного p-n-перехода, вольтфарадная характеристика которого описывается выражением (2.9), построив зависимость  $(S/C)^3$  от напряжения, получим линейную характеристику вида

$$\left(\frac{S}{C}\right)^3 = \frac{12}{e(\epsilon\epsilon_0)^2\alpha} \cdot (\varphi_k - U) \quad (2.12)$$

Экстраполируя эту прямую до пересечения с осью напряжения, можно определить величину контактной разности потенциалов. Действительно, если  $(S/C)^3=0$ , то  $U=\varphi_k$ . По наклону прямой (2.12) можно определить градиент концентрации

$$\alpha = \frac{12}{e(\epsilon\epsilon_0)^2} \cdot \frac{\Delta U}{\Delta \left(\frac{S}{C}\right)^3} \quad (2.13)$$

Вольтамперная характеристика диода описывается уравнением

$$I = I_0 \exp\left(\frac{U - I \cdot r_s}{kT}\right) \quad (2.14)$$

где  $I$  – ток, протекающий через диод;  $I_0$  – ток насыщения;  $U$  – приложенное к диоду напряжение;  $r_s$  – объемное сопротивление базы диода;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура.

Для измерения вольтамперной характеристики используется схема, представленная на рисунке 3.2.

При приложении к диоду напряжения в прямом направлении высота потенциального барьера уменьшается и, как следствие, увеличивается диффузионная компонента тока через р-п-переход. Сопротивление р-п-перехода уменьшается.

В общем случае сопротивление диода в прямом направлении будет определяться суммой сопротивления р-п-перехода и объемного сопротивления базы. При малых напряжениях, когда приложенное напряжение меньше контактной разности потенциалов, сопротивление р-п-перехода  $R_{p-n}$  много больше объемного сопротивления базы  $R_s$ , ток экспоненциально зависит от приложенного напряжения. При напряжениях больше контактной разности потенциалов сопротивление р-п-перехода становится много меньше, чем сопротивление базы, и ток линейно зависит от напряжения.

Переход от экспоненциальной зависимости к линейной наблюдается в маломощных диодах при токах порядка 2-3 мА, в мощных – 20-30 мА. Экстраполируя линейный участок вольтамперной характеристики, как показано на рис. 2.5, можно оценить контактную разность потенциалов, а по наклону линейного участка вольтамперной характеристики – найти сопротивление базы  $r_s = \frac{\Delta U}{\Delta I}$ .

Зная геометрические размеры базы, сопротивление  $r_s$ , можно определить удельное сопротивление базы

$$\rho = r_s \frac{S}{l} \quad (2.15)$$

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 примесей в базе диода:

$$N = \frac{1}{e\mu_n\rho} \quad (2.16)$$

где  $N$  – концентрация примесей в базе диода;  $e$  – заряд электрона;  $\rho$  – удельное сопротивление;  $\mu_n$  – подвижность носителей заряда (в расчетах считать, что подвижность носителей заряда не зависит от концентрации примесей).

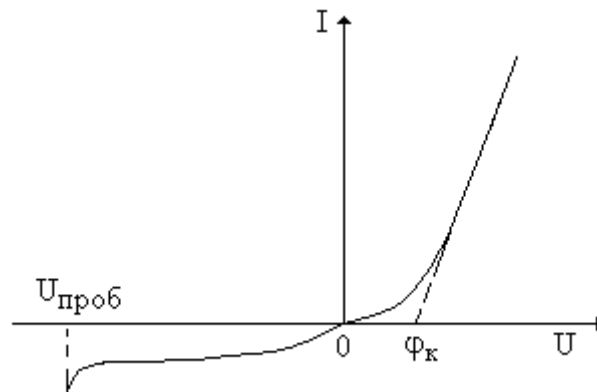


Рис. 2.5. Вольтамперная характеристика диода

При приложении обратного напряжения высота потенциального барьера возрастает и ток определяется дрейфовой компонентой тока, которая пропорциональна концентрации неосновных носителей заряда. При некотором напряжении наблюдается резкое увеличение обратного тока, т.е. наблюдается пробой 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. Зная величину пробивного напряжения, по эмпирическим соотношениям (см. ниже) можно оценить концентрацию примесей в базе резкого p-n-перехода, а для плавного p-n-перехода градиент концентрации примесей.

Вид перехода	Германий	Кремний
Резкий p <sup>+</sup> -n-переход, $U_{\text{проб}}$	$100\rho^{0,8}$	$96\rho^{0,78}$
Резкий p-n <sup>+</sup> -переход, $U_{\text{проб}}$	$55\rho^{0,8}$	$48\rho^{0,78}$
Плавный p-n-переход, $U_{\text{проб}}$	$4,46 \cdot 10^{10} a^{-0,45}$	$4,57 \cdot 10^8 a^{-0,3}$

### 3. ЗАДАНИЕ

3.1. Измерить вольтфарадную характеристику р-п-перехода при обратных напряжениях.

3.1.1. Для измерения вольтфарадной характеристики диода используется схема установки согласно рисунка 3.1.

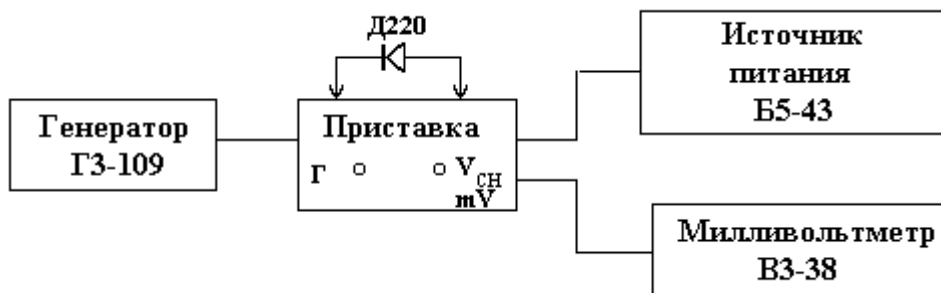


Рис.3.1. Схема установки для измерения вольтфарадной характеристики

3.1.2. Установить органы управления на приборах в следующие положения:

#### ГЗ-109 Г

- множитель частоты -  $10^3$
- частота - 200 Гц
- переключатель «Выход» - 1,5 В
- нагрузка «Ω» - АТТ

#### ВЗ-38


- переключатель «mV» - 3 mV

#### Б5-44

- «U» - установить все нули
- mA - 40 mA

3.1.3. Соединить кабелями и проводами все вышеперчисленные приборы с макетом в соответствии со схемой. Обратить особое внимание на правильность подключения Б5-44 к макету по полярности.

3.1.4. Измерение вольтфарадной характеристики диода (ВФ)

- включить все приборы в сеть;
- поставить переключатель «ВФ» – «ВА» на макете в положение «ВФ» и ручкой «» генератора ГЗ-109 установить показания по шкале ВЗ-38 равные 2. Данное показание считать за нулевое при отсчете величины емкости;
- вставить в гнездо макета «ДИОД» емкость и откалибровать шкалу ВЗ-38 (определить: сколько пФ соответствует большим и малым делениям шкалы);
- вставить в гнездо макета «ДИОД» полупроводниковый диод Д223 в обратной полярности, указанной на макете и подавая от источника Б5-44 напряжение, вначале через 0,1 В, а затем через 1 В, снять вольтфарадную характеристику диода  $C=f(U)$ ;

- проделать те же измерения для диода КД522;
- сравнить характеристики и сделать выводы.

3.2. Измерить прямую ветвь вольтамперной характеристики диода.

3.2.1. Для измерения вольтамперной характеристики диода используется схема установки согласно рис. 3.2.

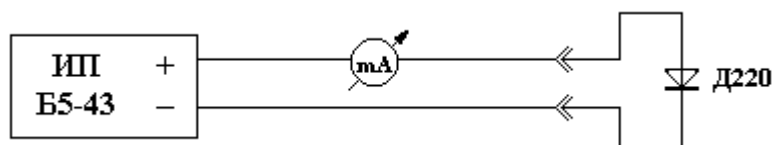


Рис.3.2. Схема установки для измерения вольтамперной характеристики

3.2.2. Измерения вольтамперной характеристики диода (ВА)

- установить тумблер на макете «ВФ-ВА» в положение «ВА»;
- вставить в гнездо макета «ДИОД» полупроводниковый диод В223, соблюдая полярность, указанную на макете (прямая полярность), и подавая от источника Б5-44 напряжение через 0,1 В, снять зависимость тока от напряжения  $I=f(U)$ . Учтеть, что начало зависимости определяется по шкале 5mA (тумблер «5 mA-50 mA» в положении «5 mA», затем – «50 mA»);
- проделать аналогичные измерения для диода Д310;
- сравнить полученные характеристики и сделать выводы.

3.2.3. Провести анализ полученных ВАХ и ВФХ. Объяснить различие в характеристиках для исследуемых диодов.

3.3. Построить функции  $(S/C)^2$  и  $(S/C)^3$  в зависимости от обратного напряжения и определить характер p-n-перехода.

3.4. Построить вольтамперную характеристику.

3.5. Определить величину контактной разности потенциалов по вольтамперной и вольтфарадной характеристикам, сравнить полученные результаты.

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

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

#### 4. ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

4.1. Площадь p-n-перехода  $S = 0,2 \text{ мм}^2$ .

4.2. Ширина базы  $l = 0,2 \text{ мм}$ .

4.3. Относительная диэлектрическая проницаемость: германий – 16,3; кремний – 11,2.

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

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

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

4.7. 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.

## 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

5.1. Объясните природу зарядной емкости.

5.2. Как на основании вольтфарадной характеристики определить величину контактной разности потенциалов?

5.3. Объясните влияние распределения примесей на вольтфарадную характеристику.

5.4. Как по вольтфарадной характеристике определить тип р-п-перехода (резкий или плавный)?

5.5. Объясните, почему пробивное напряжение р-п-перехода зависит от концентрации примесей для резкого р-п-перехода, а для плавного – от градиента концентрации.

## 6. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Епифанов Г.И., Мома Ю.А. Твердотельная электроника. – М.: Высшая школа, 1986.

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и систем связи

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной работе  
\_\_\_\_\_ О.Г. Локтионова  
« 15 » \_\_\_\_\_ 2017 г.



**ИССЛЕДОВАНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУ-  
ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Методические указания по выполнению лабораторной работы  
для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.03.02

Курск 2017



УДК 681.5

Составитель А.А. Гримов

Рецензент

Доктор технических наук, профессор А.Ф. Рыбочкин

**Исследование удельного сопротивления полупроводниковых материалов:** методические указания по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Физические основы электроники» / Юго-Зап. гос. ун-т.; сост.: А. А. Гримов. Курск, 2017. 12 с.:ил. 4. Библиогр. с. 12.

Содержатся методические рекомендации по экспериментальному определению удельного сопротивления полупроводников двухзондовым и четырехзондовым методами. Указывается порядок выполнения лабораторной работы.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать \_\_\_\_\_ . Формат 60×84 1/16.  
Усл. печ. л. \_\_\_\_ . Уч.-изд. л. \_\_\_\_ . Тираж 100 экз. Заказ \_\_\_\_ . Бесплатно.  
Юго-Западный государственный университет.  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить двух- и четырехзондовые методы измерения электропроводности полупроводниковых материалов.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Из курса физики известно, что электроны целиком заполненной зоны не могут переносить ток. В рамках модели независимых электронов это свойство определяет отличие металлов от диэлектриков: у диэлектриков в основном состоянии все зоны либо целиком заполнены, либо целиком пустые (рис.2.1,а), у металлов же в основном состоянии по крайней мере одна зона заполнена частично (рис. 2.1,б).

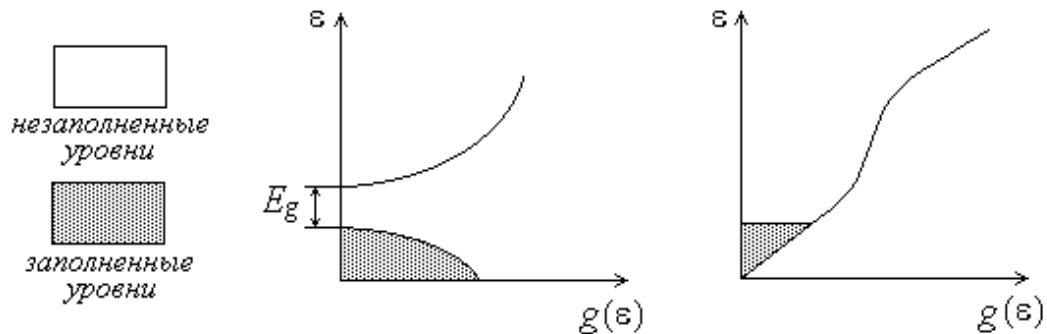


Рис.2.1. Зонная структура диэлектрика (а) и металла (б)

Мы можем охарактеризовать диэлектрики величиной энергетической щели или запрещенной зоны между потолком наиболее высоко лежащей заполненной зоны (или зон) и дном самой нижней пустой зоны (или зон) (рис.2.1).

Твердое тело, в энергетическом спектре которого имеется запрещенная зона, будет непроводящим при  $T = 0^\circ K$ .

Однако, при отличной от нуля температуре существует конечная вероятность того, что некоторые электроны будут за счет теплового движения переброшены через энергетическую щель в нижнюю из незаполненных зон, которые в этом случае называются зонами проводимости; при этом остаются незанятыми уровни в верхних заполненных зонах, называемых

валентными. Термически возбужденные электроны способны переносить ток, а в зоне, откуда они были переброшены, возможна дырочная проводимость.

Твердые тела, которые являются диэлектриками при  $T = 0 \text{ }^\circ\text{K}$ , но имеют такие энергетические щели, что тепловое возбуждение при температурах ниже точки плавления может обуславливать заметную проводимость, называют полупроводниками. Ясно, что не существует четкого различия между полупроводником и диэлектриком; грубо говоря, в наиболее важных полупроводниках энергетическая щель обычно меньше  $E_g = 2 \text{ эВ}$ , а часто составляет лишь несколько десятых электронвольта. Типичные удельные сопротивления полупроводников при комнатной температуре лежат в интервале между  $10^3$  и  $10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  в отличие от хороших диэлектриков, у которых оно может достигать  $10^4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , и от металлов где  $\rho = 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

## 2.1. Особенности измерения удельной проводимости

Многие методы измерения удельной электрической проводимости полупроводниковых материалов основаны на измерении падения напряжения на некотором участке образца, через который пропускается электрический ток. На контакте полупроводникового материала и металлического электрода при протекании электрического тока может возникать ряд физических эффектов и явлений, которые могут вносить существенную погрешность в результаты измерений и в некоторых случаях делать такие измерения невозможными. Наиболее важными из них являются:

1) высокое переходное сопротивление контакта, особенно когда контакт имеет выпрямительную характеристику и включен в измерительную цепь в обратном направлении;

2) инжекция неосновных носителей заряда контактом, существенно влияющая на величину проводимости образца;

3) эффект Пельтье (выделение или поглощение теплоты при прохождении электрического тока через контакт двух различных проводников), приводящий к возникновению градиента температуры на образце и соответствующий этому градиенту термо-э.д.с.;

4) нагрев образца электрическим током, протекающим через образец.

Указанные явления необходимо учитывать не только при измерении удельной проводимости, но и во всех случаях, когда через измеряемый образец с металлическими контактами протекает электрический ток.

Наиболее простой метод определения удельного сопротивления состоит в измерении величины сопротивления образца правильной формы с постоянным поперечным сечением. При таких измерениях необходимо, чтобы сопротивление контактов было пренебрежимо мало по сравнению с сопротивлением образца и чтобы контакты были неинжектирующие. Это возможно, если сплавные или электролитически нанесенные контакты выполнены из соответствующих материалов.

Значительная трудоемкость приготовления таких образцов, невозможность контроля свойств материала в любой части слитка или пластины ограничивают применение данного метода для технологических целей. Кроме того, определенное этим методом удельное сопротивление является усредненным по всему объему образца значением и истинным только для однородного образца. Этих недостатков в значительной степени можно избежать, если использовать зондовые методы измерения.

## 2.2. Четырехзондовый метод измерения

Четырехзондовый метод измерения удельной электропроводности полупроводников является самым распространенным. Основное преимущество четырехзондового метода состоит в том, что не требуется создания омических контактов к образцу и возможно измерение удельной проводимости образцов самой разнообразной формы и размеров. Условием для его применимости с точки зрения формы образца является наличие плоской поверхности, линейные размеры которой превосходят линейные размеры системы зондов.

Рассмотрим теоретические основы четырехзондового метода измерения удельной проводимости применительно к образцу, представляющему собой полубесконечный объем, ограниченный плоской поверхностью.

На плоской поверхности образца размещают четыре металлических электрода в виде металлических игловок - зондов с малой площадью соприкосновения. Все четыре зонда расположены вдоль одной прямой линии (рис.2.2). Через два внешних зонда (электрода) 1 и 4 пропускают электрический ток  $I$ , на двух внутренних зондах (электродах) 2 и 3 измеряют падение напряжения  $U_{23}$ . По измеренным значениям разности потенциалов между зондами 2 и 3 тока, протекающего через зонды 1 и 4, можно определить величину удельной проводимости образца.

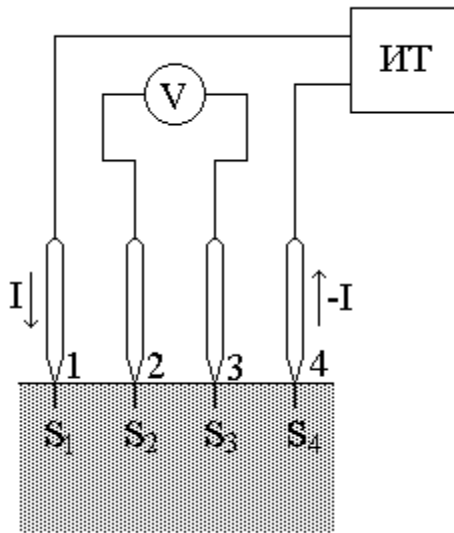


Рис.2.2. Схема измерения удельной электрической проводимости четырехзондовым методом: V - вольтметр, ИТ - источник тока

Распределение потенциала  $U(r)$  в образце полубесконечного объема (рис.2.3) имеет сферическую симметрию и описывается уравнением Лапласа в сферической системе координат:

$$\Delta U(r) = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left( r^2 \frac{dU}{dr} \right) = 0. \quad (2.1)$$

На это уравнение накладывается условие, что потенциал в точке  $r=0$  положителен и стремится к нулю при очень больших  $r$ .

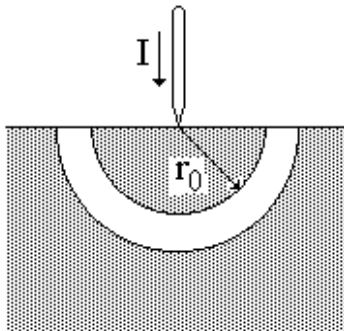


Рис.2.3. Модель зонда

Интегрирование этого уравнения с учетом этого условия дает следующее решение:  $U(r) = -C/r$ , где константу интегрирования определяют из условия для напряженности электрического поля  $E$  при некотором значении  $r=r_0$ :

$$E(r_0) = - \left. \frac{dU(r)}{dr} \right|_{r=r_0} = j\rho = \frac{I\rho}{2\pi r_0^2}, \quad (2.2)$$

где  $j=I/(2\pi r_0^2)$  - плотность тока, протекающего через полусферу радиусом  $r_0$ .

После интегрирования уравнения (2.2) получаем

$$U(r) = \frac{I\rho}{2\pi r}. \quad (2.3)$$

Очевидно, что распределение потенциала будет таким же, если зонд имеет с поверхностью образца контакт в виде полусфере конечного диаметра.

Пусть радиус контакта равен  $r_1$ , тогда падение напряжения на образце равно потенциалу зонда и составляет

$$U = \frac{I\rho}{2\pi r_1}. \quad (2.4)$$

Из сравнения падения напряжения на приконтактном слое толщиной

$$U(r_1) - U(r_2) = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{r_2 - r_1}{r_2 r_1} \quad (2.5)$$

и полного падения напряжения на образце (2.4) очевидно, что основное изменение потенциала происходит вблизи зонда. Например, при  $r_2=10r_1$  полное падение напряжения на образце превосходит падение в слое  $r_2-r_1$  всего лишь на 10 %. Это означает, что величина протекающего через зонд тока определяется главным образом сопротивлением приконтактной области, протяженность которой тем меньше, чем меньше радиус контакта.

Сформулируем условия, необходимые для измерения проводимости четырехзондовым методом:

- 1) измерения проводятся на плоской поверхности однородного изотропного образца;
- 2) инжекция неосновных носителей заряда в объем образца отсутствует из-за достаточно высокой скорости поверхностной рекомбинации, что достигается соответствующей обработкой поверхности образца;
- 3) поверхностная утечка тока отсутствует;
- 4) зонды имеют контакты с поверхностью образца в точках, которые расположены вдоль прямой линии;
- 5) граница между токонесущими электродами и образцом имеет

- форму полусферы малого диаметра;
- б) диаметр контакта зонда мал по сравнению с расстоянием между зондами.

Потенциал в любой точке образца равен сумме потенциалов, создаваемых в этой точке током каждого электрода. При этом потенциал имеет положительный знак для тока, втекающего в образец (зонд 1), и отрицательный знак для тока, вытекающего из образца (зонд 4). Таким образом, потенциалы измерительных зондов 2 и 3 равны соответственно

$$U_2 = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2 + S_3} \right)$$

и

$$U_3 = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{S_1 + S_2} - \frac{1}{S_3} \right), \quad (2.6)$$

а разность потенциалов

$$U_{23} = U_2 - U_3 = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2 + S_3} - \frac{1}{S_1 + S_2} + \frac{1}{S_3} \right). \quad (2.7)$$

Соотношение (2.7) позволяет определить удельное сопротивление образца:

$$\rho = \frac{U_{23}}{I} \frac{2\pi}{\left( \frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2 + S_3} - \frac{1}{S_1 + S_2} + \frac{1}{S_3} \right)}. \quad (2.8)$$

Если расстояния между зондами одинаковы, т.е.  $S_1=S_2=S_3=S$ , то

$$\rho = \frac{U_{23}}{I} 2\pi S, \quad (2.9)$$

где  $U_{23}$  в В;  $I$  в А;  $S$  в м;  $\rho$  в Ом·м.

Чувствительность четырехзондового метода по напряжению, как видно из (2.7), прямо пропорциональна величине протекающего тока и обратно пропорциональна эквивалентному расстоянию между зондами:

$$\frac{1}{S_{\text{эКВ}}} = \frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2 + S_3} - \frac{1}{S_1 + S_2} + \frac{1}{S_3}. \quad (2.10)$$

Поскольку увеличение протекающего через образец тока ограничено

допустимым нагревом образца, повысить чувствительность можно, уменьшая эквивалентное расстояние между зондами за счет увеличения расстояния  $S_2$  между измерительными зондами.

### 2.3. Двухзондовый метод измерения

Двухзондовый метод применяется для измерения удельной проводимости образцов имеющих правильную геометрическую форму (цилиндр, параллелепипед) с постоянным сечением по всей длине образца.

Через торцевые грани (рис.2.4) с нанесенными на них омическими контактами (токовые электроды) пропускается электрический ток. На боковой поверхности образца вдоль линии тока располагаются два зонда на расстоянии  $l$  друг от друга, с которых снимается падение напряжения. Расчет ведется по формуле:

$$\rho = \frac{V}{J} \cdot \frac{A}{S}, \quad (\text{Ом}\cdot\text{м}), \quad (2.11)$$

где  $J$  [А] - сила тока через образец;  $V$  [В] - напряжение между зондами;  $S$  [м] - расстояние между зондами;  $A$  [м<sup>2</sup>] - площадь поперечного сечения.

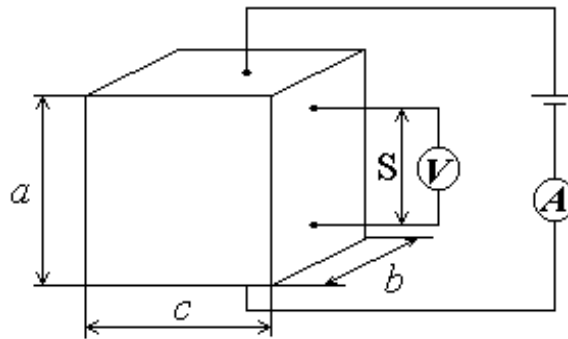


Рис.2.4. Схема двухзондового метода измерения удельной электропроводности

Наибольший вклад в погрешность вносит ошибка измерения геомет-



рических размеров образца. При длине образца 5 мм абсолютная ошибка измерения линейного размера 0,1 мм даст погрешность 2%. При использовании образцов в виде прямоугольных параллелепипедов приходится измерять три линейных размера, при этом суммарная погрешность будет 3%. На точность измерений влияет фотопроводимость и фото ЭДС на контактных барьерах под измерительными зондами (потенциальными), особенно для высокоомных полупроводников. Поэтому ток во время измерения не должен заметным образом нагревать образец, его выбирают минимально возможным.

### 3. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Исследование удельного сопротивления полупроводников 2-х и 4-х зондовым методом производится на лабораторном стенде СФП-5. При проведении измерений удельного сопротивления необходимо манипулятор соединить с соответствующим разъемом блока управления, подключить к клеммам "V" блока управления соответствующие клеммы цифрового мультиметра С1-107 или цифрового вольтметра.

Переключатель "*род работы*" **П2** установить в положение 23, а затем 43, что будет соответствовать измерению с помощью 2-х (23) и 4-х (43) зондового методов.

Измеряемые образцы помещаются в манипулятор и ручками "*Ток образца*" - "*Грубо*", "*Плавно*" задается необходимый ток.

Переключателем "*Полярность тока*" можно изменять направление тока через образец.

Положение переключателя **П3** при проведении работ должно быть крайним (*Т1*).

Положение переключателя **П1** зависит от силы тока через образец.

Остальные тумблеры должны быть в нижнем положении, кроме "*Сеть*" (верхнее) и "*Нагрев образца*" (нейтральное).

### 4. ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Перед измерениями включить стенд СФП-5 и мультиметр С1-107 (или цифровой вольтметр) в сеть и прогреть не менее 5 минут. Затем, подключая поочередно образцы полупроводниковых материалов, измерьте

напряжение  $V$  между зондами мультиметром С1-107 двухзондовым и четырехзондовым методами. Измерения необходимо провести в каждом случае для двух полярностей тока, а результаты, полученные для разных полярностей тока усреднить. Результаты измерений представляются в виде таблицы.

Таблица 4.1

Название материала	J [A]	V [В] , двухзондовый метод			V [В] , четырехзондовый метод		
		V <sup>+</sup>	V <sup>-</sup>	$\frac{V^+ + V^-}{2}$	V <sup>+</sup>	V <sup>-</sup>	$\frac{V^+ + V^-}{2}$

## 5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Удельное сопротивление полупроводниковых материалов при измерении 2-х и 4-х зондовым методом рассчитывается по формуле (2.11) и (2.9) соответственно.

Полученные результаты следует оформить в виде таблицы.

Таблица 5.1

Название материала	2-х зондовый метод $\rho = \langle \rho \rangle \pm \Delta$ [Ом·м]	4-х зондовый метод $\rho = \langle \rho \rangle \pm \Delta$ [Ом·м]

где  $\Delta$  - систематическая ошибка измерений.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение понятий: удельное сопротивление, удельная проводимость. В каких единицах измеряются эти величины в СИ?
2. Объясните с чем связано отличие полупроводников от диэлектри-

ков?

3. Каким образом ширина щели между заполненными и незаполненными зонами влияет на сопротивление диэлектрика?

4. Чем определяется точность определения удельного сопротивления 2-х и 4-х зондовыми методами?

5. В чем преимущества 4-х зондового метода измерения перед 2-х зондовым?

6. Чем определяется систематическая ошибка измерений?

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Епифанов Г.Н. Физические основы микроэлектроники. М.: Советское радио, 1971. 375 с.

2. Епифанов Г.Н. Физика твердого тела. М.: Высшая школа, 1977. 288с.

3. Дулин В.Н. Электронные приборы. М.: Энергия, 1977. 424 с.

4. Смит З. Полупроводники. М.: Мир, 1982. 560 с.

5. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника. М.: Высшая школа, 1991. 351 с.

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и систем связи

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной работе  
\_\_\_\_\_ О.Г. Локтионова  
« 15 » \_\_\_\_\_ 2017 г.



**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ФОТОДИОДОВ**

Методические указания по выполнению лабораторной работы  
для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.03.02

Курск 2017

УДК 681.5

Составитель А.А. Гримов

Рецензент

Доктор технических наук, профессор А.Ф. Рыбочкин

**Исследование фотоэлектрических свойств фотодиодов:**

методические указания по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Физические основы электроники» / Юго-Зап. гос. ун-т.; сост.: А. А. Гримов. Курск, 2017. 9 с.: ил. 3. Библиогр.: с. 9.

Содержатся методические рекомендации по экспериментальному определению параметров фотодиодов. Указывается порядок выполнения лабораторной работы.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60×84 1/16.  
Усл. печ. л. \_\_\_\_ Уч.-изд. л. \_\_\_\_ Тираж 100 экз. Заказ . Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить физические основы работы фотодиода и методику измерения его вольт-амперных характеристик.

## 2. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОТОДИОДА

Фотодиоды служат для преобразования оптических сигналов в электрические. Принцип действия фотодиодов основан на разделении в р-n переходе неравновесных носителей зарядов, создаваемых светом. Для изготовления фотодиодов используются германий, кремний, арсенид галлия и др. полупроводники. Пример конструкции фотодиода приведен на рис 2.1.

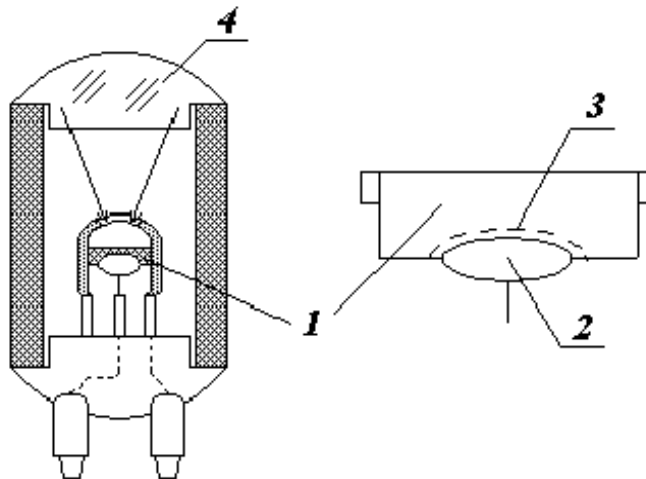


Рис.2.1. Конструкция германевого фотодиода ФД-3: 1 - пластинка монокристалла германия; 2 - вплавленный электрод; 3 - р-n-переход; 4 - собирающая линза.

## 3. ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Процесс генерирования и разделения электронно-дырочных пар при освещении в р-n переходе показан на рис.3.1. При энергии фотонов  $h\nu$  больше ширины запрещенной зоны свет поглощается в приповерхностном слое полупроводника толщиной около  $1 \text{ мкм}$ . Если излучение монохроматическое, то количество пар носителей заряда, генерируемых в единицу времени в полупроводнике, равно

$$\eta = \frac{\Phi_{эл}}{h \cdot \nu} \quad (3.1)$$

где  $\Phi_{эл}$  - монохроматический поток излучения;  $\eta$  - квантовый выход внутреннего фотоэффекта.

Под действием градиента концентрации генерируемые электронно-дырочные пары диффундируют вглубь проводника на расстояние, определяемое их диффузионной длиной  $L_n, L_p$ .

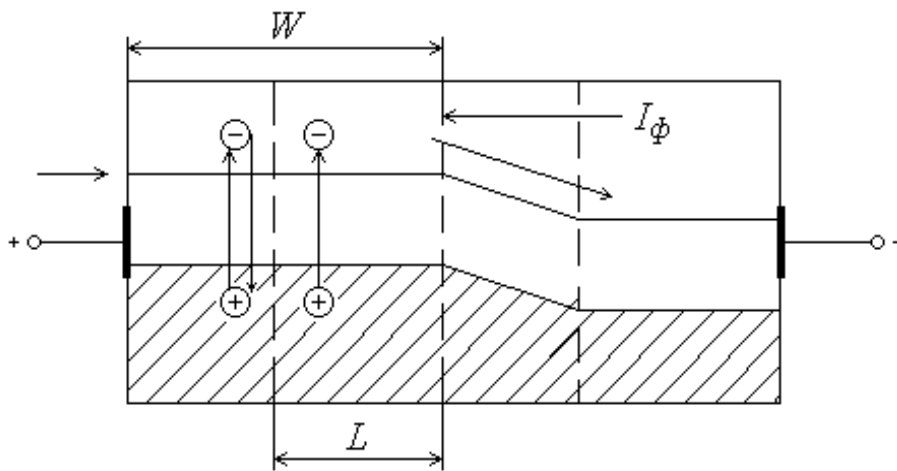


Рис.3.1. Схема генерации и разделения пар носителей заряда при освещении p-n-перехода.

Если глубина залегания p-n-перехода  $W$  значительно меньше диффузионной длины  $L$ , то неравновесные электроны и дырки достигают p-n-перехода практически без рекомбинаций.

Контактное поле в p-n-переходе направлено так, что переносит через p-n-переход неосновные носители заряда (дырки в p-область, электроны в n-область). Основные носители, для которых контактное поле является тормозящим, остаются в объеме той области полупроводника, где они возникают. Фотон, т.е. ток, образованный потоком через p-n-переход генерированных светом неосновных носителей, соответствует количеству подошедших к переходу пар и определяется величиной

$$I_{\phi} = \frac{q}{h \cdot \nu} \eta \beta \Phi_{эл} = S_{\lambda} \Phi_{эл} \quad (3.2)$$

где  $\beta$  - отношение числа пар носителей, дошедших до границы p-n-перехода, к полному числу генерируемых пар (коэффициент собирания

или эффективность разделения пар);  $S_\lambda$  - монохроматическая чувствительность.

При разомкнутой внешней цепи р-п перехода процесс разделения и накопления носителей, генерируемых светом, приводит к возникновению разности потенциалов  $V_{xx}$ , называемой фото э.д.с.

#### 4. РЕЖИМЫ РАБОТЫ И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ФОТОДИОДА

Вольт-амперная характеристика фотодиода при освещении имеет вид

$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] - I_\phi, \quad (4.1)$$

где  $I_s$  - темновой ток насыщения.

Наибольшее влияние освещение оказывает на обратную ветвь вольт-амперной характеристики (рис.4.1), при прямых напряжениях вклад фототока в полный ток оказывается заметным лишь при очень больших уровнях освещенности. Режим работы фотодиода при обратном приложенном напряжении называется фотодиодным, а без приложенного напряжения - фотогоальваническим или вентильным.

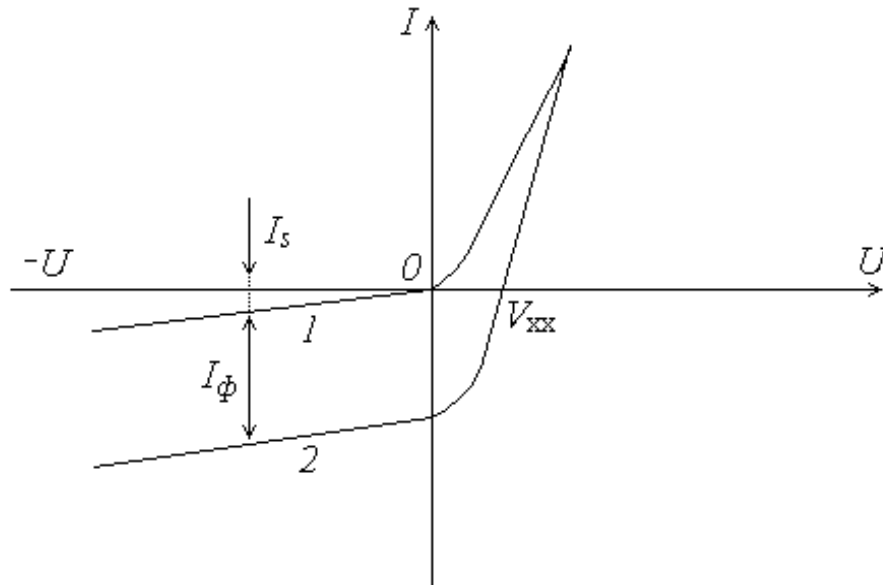


Рис.4.1. Вольт-амперные характеристики неосвещенного (1) и освещенного (2) фотодиода

Из вольт-амперной характеристики можно определить фото э.д.с. по напряжению, при котором полный ток равен нулю. Напряжение, приняв в выражении (4.1)  $I = 0$ , получим



$$V_{xx} = \frac{kT}{q} \ln \left( 1 + \frac{I_{\phi}}{I_s} \right). \quad (4.2)$$

Фото э.д.с. не может превысить контактной разности потенциалов, которая при высокой степени легирования р- и n- областей близка к ширине запрещенной зоны полупроводника.

Зависимость фототока от потока излучения, подающегося на фотодиод, называется энергетической характеристикой фототока. Энергетические характеристики фототока фотодиодов линейны в широких пределах и мало изменяются при изменении напряжения.

Основными параметрами, характеризующими свойства фотодиодов, являются следующие:

1) интегральная чувствительность (чувствительность к немонахроматическому излучению заданного спектрального состава), определяемая соотношением

$$S = \frac{I_{\text{общ}} - I_T}{\Phi(r)}, \quad (4.3)$$

где  $I_{\text{общ}}$  - ток в цепи освещенного фотодиода;  $I_T$  - темновой ток, измеряемый при небольшом обратном напряжении.

Токовая чувствительность фотодиода  $S_J$  одинакова и в фотодиодном и в фотогальваническом режиме. Вольтовая чувствительность зависит от сопротивления нагрузки  $R_n$  :

$$S_V = S_J R_n ; \quad (4.4)$$

2) максимально допустимое напряжение, величина которого ограничивается напряжением пробоя;

3) темновой ток, который определяется концентрацией и диффузионной длиной равновесных неосновных носителей заряда в полупроводнике и зависит от ширины запрещенной зоны полупроводника и температуры ;

4) собственная постоянная времени, характеризующая инерционность прибора. У обычных фотодиодов, в конструкции которых не предусмотрено специальных мер для повышения быстродействия, постоянная времени определяется временем диффузии неосновных носи-

телей к р-п переходу. При глубине залегания р-п перехода в несколько микрометров время диффузии может быть  $10^{-7}$  -  $10^{-8}$  с.

В таблице приведены основные параметры некоторых германиевых и кремниевых фотодиодов, выпускаемых промышленностью.

Основные параметры фотодиодов из германия и кремния

Наименование параметра	Германиевый ФД-1	Германиевый ФД-2	Германиевый ФД-3	Кремниевый ФД-К1
Площадь светочувствительного элемента, мм <sup>2</sup>	5	1	2	2
Рабочее напряжение, В	15	30	10	20
Максимально допустимое напряжение, В	20	50	-	-
Темновой ток, мкА	30	25	15	3(1-2)
Интегральная чувствительность, мА/лм	20	10-20	20	3
Собственная постоянная времени, с	$10^{-5}$	$10^{-5}$	$10^{-5}$	$10^{-5}$
Допустимый диапазон температур, °С	-60	-40	-60	-50
Диапазон монохроматической чувствительности, мкм	0,5-1,7	0,5-1,7	0,5-1,8	0,4-1,2

## 5. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

1. Для выполнения работы используют стенд ЛР №11.
2. В стенде размещены: фотодиод типа 1690Б, лампа подсветки с изменяемым световым потоком, регулируемый источник напряжения, вольтметр и микроамперметр.
3. Стенд позволяет снимать вольт-амперные характеристики фотодиода в отсутствие освещения и при двух значениях светового потока  $\Phi-1$  и  $\Phi-2$ .

## 6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Перед включением стенда в сеть необходимо органы управления установить в исходное положение :

- тумблер "Сеть" в положение "Выкл" ;
- тумблер "Подсветка" в положение "Выкл" ;
- тумблер "Ф-1 - Ф-2" в положение "Ф-1" ;
- тумблер "Питание" в положение "1В";
- тумблер "Вкл. Диода" в положение "Прямо" ;
- ручку "Рег. напряжения" в крайнее левое положение.

2. Снятие вольт-амперной характеристики фотодиода при отсутствии освещения проводится следующим образом:

- установить все органы управления в исходное положение ;
- включить стенд, для чего "Сеть" установить в положение "Вкл";
- изменяя напряжение на фотодиоде с помощью ручки "Рег. напряжения", снимите зависимость  $I_{np} = f(U_{np})$ .

Данные занести в таблицу.

Примечание: При установке переключателя "Питание" в положение "1В" вся шкала вольтметра соответствует 1 вольту, а при установке "10В" -10 вольтам.

3. Снятие обратной ветви вольт-амперной характеристики фотодиода проводится следующим образом:

- установить тумблер "Вкл. Диода" в положение "Обратно" ;
- установить тумблер "Питание" в положение "10В" ;
- изменяя напряжение на фотодиоде с помощью ручки "Рег. напряжения", снимите зависимость  $I_{обр} = f(U_{обр})$ .

4. Для снятия вольт-амперной характеристики при освещении необходимо:

- установить органы управления в исходное положение ;
- включить стенд ;
- установить тумблер "Подсветка" в положение "Вкл." ;
- пользуясь ручкой "Рег. Напряжения" и тумблерами "Вкл. Диода", "Питание" и " Ф-1 - Ф-2 ", снимите прямую и обратную ветви вольт-амперной характеристики фотодиода по методике, изложенной в пп. 2 и 3, сначала при световом потоке  $\Phi -1$ , а затем при световом потоке  $\Phi -2$ . Данные занести в таблицу, оформить в виде графиков.

5. Определить величину фото э.д.с. при двух значениях светового потока двумя способами: из прямой ветви вольтамперной характеристики и по выражению (4.2), при этом  $I_s$  принять равным  $1,1 \cdot 10^{-7}$   $\mu$ А.

6. Определить интегральную чувствительность фотодиода при двух значениях светового потока по выражению (4.3). При этом све-

товой поток  $\Phi(r)$ , соответствующий положению переключателя в положении « $\Phi-1$ » равен  $2,23 \cdot 10^{-2}$  лм, а в положении « $\Phi-2$ » - равен  $4,15 \cdot 10^{-2}$  лм

Значение  $I_T$  при расчетах можно принять равным 0.

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем определяется темновой ток фотодиода?
2. Какой механизм фотогенерации при освещении р-n-перехода приводит к возникновению фото э.д.с.
3. Будет ли наблюдаться фото э.д.с. при освещении  $n^+ - n$  или  $p^+ - p$  переходов?
4. Покажите, что ток короткого замыкания фотодиода при освещении равен фототоку  $I_f$ . Как будет изменяться этот ток при увеличении сопротивления нагрузки ?
5. Чем объясняется возможный рост чувствительности фотодиода при увеличении обратного напряжения ?
6. Чем определяется собственная постоянная времени фотодиода ?
7. Как можно повысить чувствительность фотодиода к немонахроматическому излучению заданного спектрального состава?
8. Чем обусловлены различия диапазонов монохроматической чувствительности фотодиодов из германия и кремния ?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Епифанов Г.Н. Физические основы микроэлектроники. М.: Советское радио, 1971. 375 с.
2. Епифанов Г.Н. Физика твердого тела. М.: Высшая школа, 1977. 288с.
3. Дулин В.Н. Электронные приборы. М.: Энергия, 1977. 424 с.
4. Смит З. Полупроводники. М.: Мир, 1982. 560 с.
5. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника. М.: Высшая школа, 1991. 351 с.