

**010812. Исследование ВАХ диода при различных температурах.**

**Цель работы:** Исследовать ВАХ диода при различных температурах.

**Требуемое оборудование, входящее в состав модульного учебного комплекса МУК-ТТ2:**

- |   |       |
|---|-------|
| 1. Измеритель статических характеристик ИСХ1    | 1 шт. |
| 2. Стенд с объектами исследования СЗ-ТТ03       | 1 шт. |
| 3. Соединительные провода с наконечниками Ш4-Ш4 | 1 шт. |

*Краткое теоретическое введение*

Полупроводниковым диодом называют полупроводниковый прибор, состоящий из одного или нескольких  $p-n$  переходов и двух выводов. В зависимости от основного назначения и вида используемого явления в  $p-n$  переходе различают следующие типы полупроводниковых диодов: выпрямительные, высокочастотные, импульсные, туннельные, стабилитроны, варикапы.

Низкоомный  $p$ -слой, содержащий много основных носителей тока, называют эмиттером, а более высокоомный  $n$ -слой называют базой. На рис. 1 представлены структуры планарноэпитаксиального (а) и сплавного (б) диодов. База и эмиттер образуют омические переходы (контакт) с электродами. К электродам подсоединены металлические выводы, посредством которых диод включается в цепь.

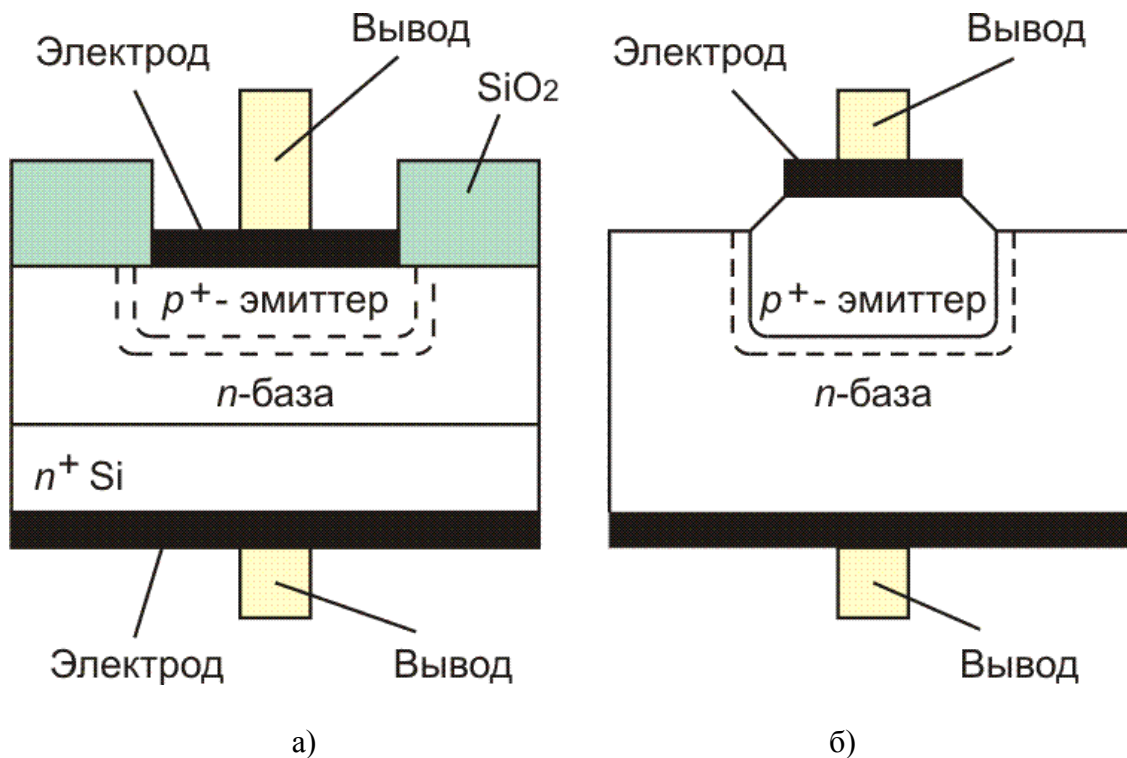


Рис. 1

### Вольт-амперная характеристика диода.

Основной характеристикой полупроводниковых диодов является вольт-амперная характеристика (ВАХ). ВАХ представляет собой зависимость тока во внешней цепи  $p-n$  перехода от значения и полярности прикладываемого к нему напряжения.

Для идеального  $p-n$  перехода ВАХ описывается следующей зависимостью (пунктирная кривая на рис.2):

$$I = I_0 \left( \exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right) \quad (1)$$

где  $I_0$  – обратный (или тепловой) ток;

$q$  – заряд электрона;

$k$  –  $1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К

$T$  – температура.

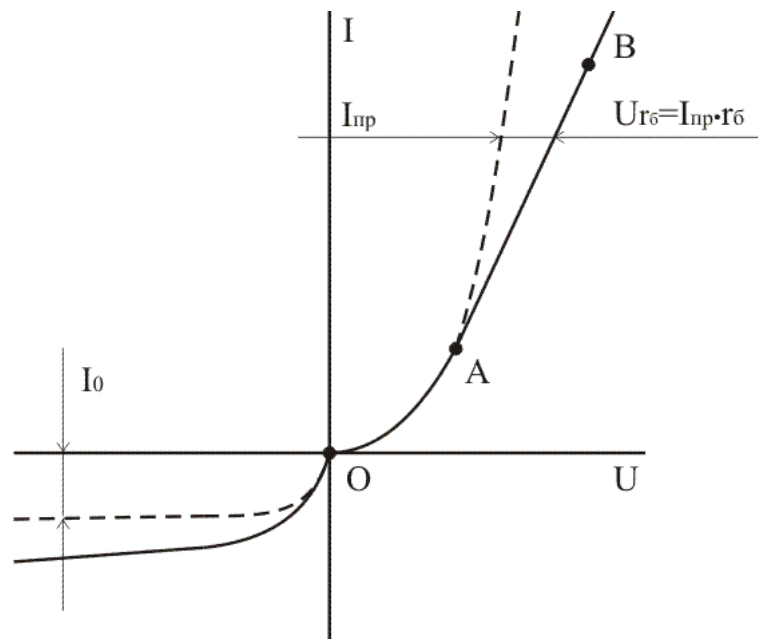


Рис. 2

В прямом смещении ВАХ ( $U > 0$ ) реального диода (сплошная кривая на рис.2) близка к экспоненциальной только в начале зависимости - участок OA, а далее рост тока при увеличении прямого напряжения замедляется и характеристика становится более пологой - участок AB. Этот участок характеристики называют омическим, поскольку здесь оказывает влияние объемное сопротивление базы  $r_{\delta}$   $p-n$  перехода. Ток, протекая через  $r_{\delta}$ , создает падение напряжения:

$$U_{r\delta} = I_{пр} r_{\delta} \quad (2)$$

При этом внешнее напряжение не полностью падает на  $p-n$  переходе, а распределяется между ним и слоем базы. С учетом этого уравнения реальная ВАХ принимает вид:

$$I_{пр} = I_0 \left( \exp\left(\frac{q(U_{пр} - r_{\delta} I_{пр})}{kT}\right) - 1 \right) \quad (3)$$

Таким образом, влияние объемного сопротивления базы на прямую ветвь ВАХ реального  $p-n$  перехода проявляется в виде смещения прямой ветви в сторону больших значений прямых напряжений. Поэтому, чем больше  $r_{\delta}$ , тем позже идет прямая ветвь ВАХ реального перехода.

Как правило,  $p$ - $n$  переходы с большими значениями  $r_6$  выполняются для увеличения допустимого рабочего обратного напряжения на  $p$ - $n$  переходе.

В области обратных напряжений можно пренебречь падением напряжения в объёме полупроводника, т.к.  $r_6$  всегда много меньше сопротивления объемного заряда обратносмещенного перехода (за исключением области пробоя). Отличия реальной обратной ветви ВАХ ( $U < 0$ )  $p$ - $n$  перехода от идеальной состоят в следующем: обратный ток реальной ВАХ растет при увеличении обратного напряжения  $p$ - $n$  перехода и имеет значение, не равное  $I_0$ . Данная зависимость приведена на рис.2 (сплошная кривая). Это объясняется тем, что в реальном  $p$ - $n$  переходе обратный ток содержит несколько составляющих:

$$I_{обр} = I_0 + I_{m2} + I_y, \quad (4)$$

где  $I_{m2}$  - ток термогенерации в области  $p$ - $n$  перехода  
 $I_y$  - ток утечки.

Ток термогенерации  $I_{m2}$  вызван тепловой генерацией носителей внутри  $p$ - $n$  перехода. Он увеличивается с ростом обратного напряжения, так как происходит расширение  $p$ - $n$  перехода.

Ток утечки  $I_y$  возникает в местах выхода  $p$ - $n$  перехода на поверхность. При современной технологии изготовления  $p$ - $n$  перехода  $I_y$  имеет незначительную величину.

### Температурная зависимость ВАХ

При увеличении температуры уменьшается контактная разность потенциалов, энергия основных носителей заряда возрастает, соответственно растет диффузионная составляющая тока и прямой ток увеличивается (рис. 3). Иначе говоря, при большей температуре  $p$ - $n$ -перехода тот же прямой ток достигается при меньшем смещении.

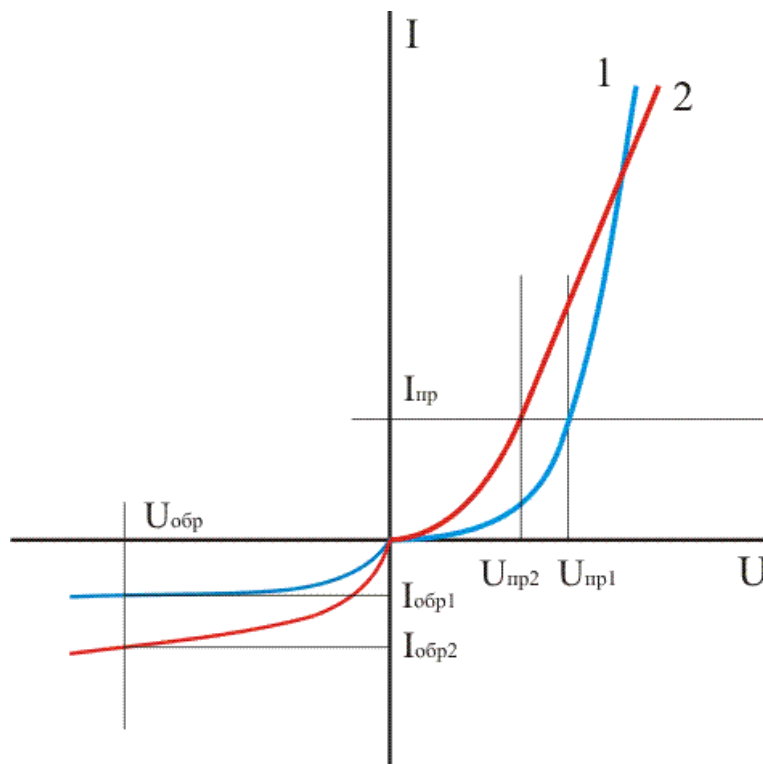


Рис. 3

Для оценки влияния температуры вводится **температурный коэффициент напряжения прямой ветви**, под которым понимается величина, показывающая, на сколько изменится прямое напряжение для получения одной и той же величины прямого тока при изменении температуры на 1 градус.

При больших прямых токах нельзя пренебречь сопротивлением базы, которое увеличением температуры растет из-за снижения подвижности свободных носителей заряда. Таким образом, результирующая ВАХ диода при прямом смещении сложным образом зависит от  $T$ . При малых токах характеристика смещается с ростом  $T$  влево, а при больших токах (где влияние базы сильнее) – вправо.

С ростом температуры увеличивается скорость тепловой генерации электронно-дырочных пар во всех областях  $p$ - $n$  перехода. Это приводит к резкому возрастанию с температурой концентрации неосновных носителей в  $n$ - и  $p$ -областях перехода и, следовательно, к увеличению тока насыщения (рис.3 при  $U < 0$ ) и ухудшению выпрямляющих свойств диода.

Следует отметить, что при некоторой температуре концентрации основных носителей становится приближенно равной концентрации неосновных носителей, и переход исчезает совсем.

### Зависимость ВАХ от материала полупроводника.

Полупроводниковые диоды отличаются друг от друга материалом полупроводника. Наиболее часто в них используют германий или кремний. Вольт-амперные характеристики кремниевого и германиевого диодов представлены на рис. 4. Главная причина отличия ВАХ  $p$ - $n$  переходов – это различное значение ширины запрещенной зоны полупроводниковых материалов. Чтобы появился прямой ток, необходимо уменьшить величину потенциального барьера. Для этого на  $p$ - $n$  переход нужно подать прямое напряжение, близкое к значению контактной разности потенциалов  $\phi_k$ . В  $p$ - $n$  переходе на основе германия  $\phi_k = (0,3 \div 0,4)$  В, в  $p$ - $n$  переходе на основе кремния  $\phi_k = (0,6 \div 0,8)$  В. Поэтому прямая ветвь ВАХ кремниевого  $p$ - $n$  перехода относительно германиевого смещается вправо на  $(0,3 \div 0,5)$  В.

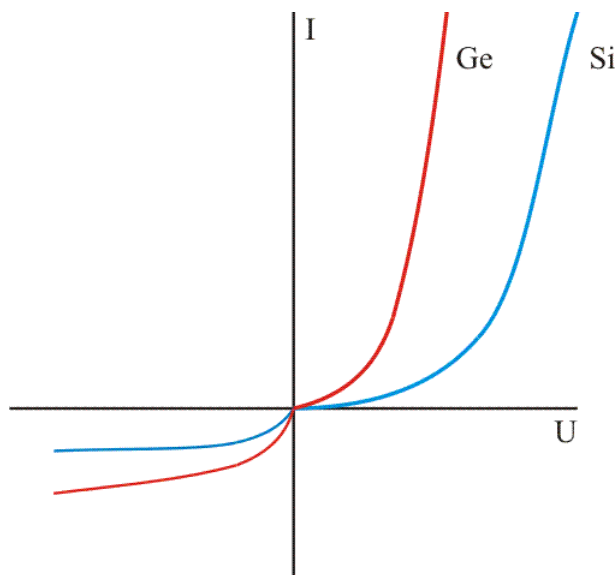


Рис. 4

Следует отметить, что **обратный ток кремниевых  $p$ - $n$  переходов много меньше обратного тока германиевых  $p$ - $n$  переходов.** Это связано с различием ширины запрещенной зоны:  $\Delta W_{z\text{ Ge}} = 0,72$  эВ;  $\Delta W_{z\text{ Si}} = 1,12$  эВ. Ток насыщения определяется в основном неосновными носителями заряда, имеющими место в примесном полупроводнике. Так, например, в полупроводнике  $n$ -типа это дырки –  $p_n$ , концентрация которых определяется в соответствии с законом действующих масс:  $p_n = n_i^2 / n_n$ . Известно, что  $n_i\text{ Ge} \approx 10^{13}\text{ см}^{-3}$ , а  $n_i\text{ Si} \approx 10^{10}\text{ см}^{-3}$ . При равной концентрации примеси получаем, что концентрация неосновных носителей заряда в кремниевом полупроводнике на шесть порядков меньше, чем в германиевом примесном полупроводнике, поэтому ток  $I_0$  в кремниевом  $p$ - $n$  переходе пренебрежимо мал.

Обратный ток германиевого  $p$ - $n$  перехода включает следующие составляющие:  $I_{\text{обр Ge}} \approx I_0 + I_y$ , а обратный ток кремниевого  $p$ - $n$  перехода -  $I_{\text{обр Si}} \approx I_{\text{тр}} + I_y$ . Для германиевых  $p$ - $n$  переходов обратный ток в основном определяется током насыщения и имеет величину десятки микроампер.

Ток термогенерации у них мал и им обычно пренебрегают. Незначительный наклон обратной ветви ВАХ германиевых  $p-n$  переходов обусловлен током утечки.

Обратный ток кремниевого  $p-n$  перехода примерно на три - четыре порядка меньше обратного тока германиевого перехода и определяется током термогенерации, т.е дрейфовым током неосновных носителей, возникающих в результате тепловой генерации в самом  $p-n$  переходе.  $I_{mz}$  увеличивается с ростом обратного напряжения, так как происходит расширение  $p-n$  перехода. Ток термогенерации невелик из-за малого объема  $p-n$  перехода, ток утечки при современной технологии изготовления  $p-n$  перехода имеет незначительную величину. Отсюда в целом обратный ток кремниевого  $p-n$  перехода имеет небольшое значение, по сравнению с обратным током германиевых  $p-n$  переходов

При повышении температуры абсолютная величина изменения обратного тока в кремниевом диоде значительно меньше, чем в германиевом.

### *Методика проведения эксперимента*

#### **Особенности измерения статических ВАХ полупроводниковых приборов.**

Для измерения статических ВАХ полупроводниковых диодов имеет значение выбор схемы включения измерительных приборов. На рис. 5 представлены две возможные измерительные схемы.

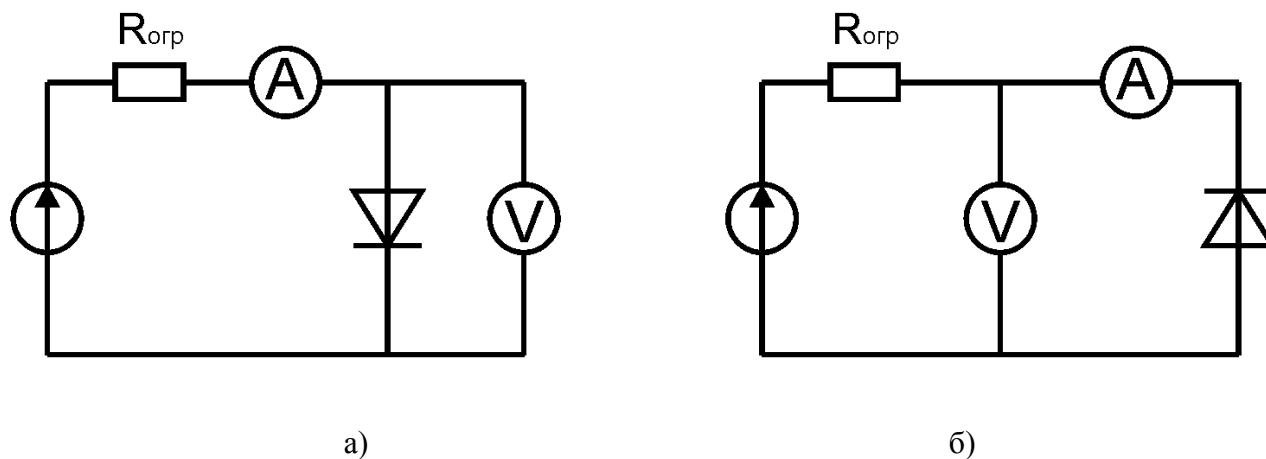


Рис. 5

Если внутренне сопротивление амперметра равно нулю, а внутреннее сопротивление вольтметра стремится к бесконечности, то эти две схемы идентичны. При работе с реальными измерительными приборами эти условия не выполнимы.

Схему рис. 5а принято применять в случае, если внутреннее сопротивление вольтметра намного больше сопротивления исследуемого полупроводникового прибора (например, диод в прямом смещении).

Схему рис. 5б принято применять в случае, если внутреннее сопротивление амперметра намного меньше сопротивления исследуемого полупроводникового прибора (например, диод в обратном смещении).

При составлении измерительной схемы очень важно правильно соблюсти полярность генератора и измерительных приборов, а так же учесть их возможную электрическую связь друг с другом (гальванически развязаны, имеют общую «землю» или какое-то сопротивление связи).

#### **Особенности измерения статических ВАХ полупроводниковых приборов с помощью прибора ИСХ1.**

Исследование вольт-амперных характеристик диода производится с помощью модульного учебного комплекса МУК-ТТ2 рис. 6, в состав которого входит измеритель статических характеристик ИСХ1. Он содержит в себе генератор испытательных сигналов, амперметр и два вольтметра.

Прибор ИСХ1 позволяет проводить запись полученных данных на ЭВМ через СОМ-порт. Для этого необходимо воспользоваться программой управления прибором **ish1.exe**.

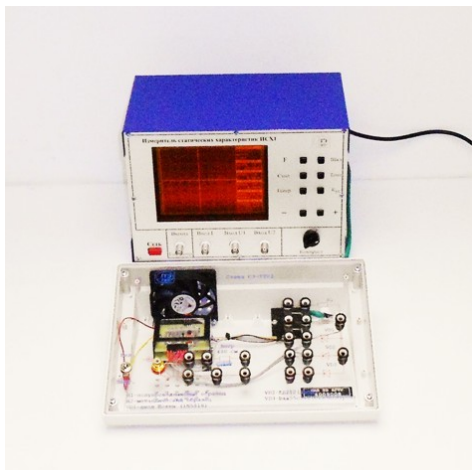


Рис.6

Генератор напряжения и вольтметры имеют общую «землю», а амперметр имеет сопротивление связи 1 МОм. Входное сопротивление вольтметров составляет 1 МОм, а сопротивление амперметра (в диапазоне с масштабным коэффициентом 10 мА/дел.) составляет 3 Ом.

На экране измерителя ИСХ1 может отображаться одновременно ВАХ прямого и обратного смещения диода. По этой причине одна из характеристик в зависимости от выбора схемы включения будет отображаться с систематической погрешностью.

Рекомендуется для исследования диода выбрать схему для обратного смещения рис. 7. В этом случае обратная ветвь будет отображаться корректно, а прямая - иметь ошибку определения падения напряжения на диоде не более 10%. Для тока 20 мА падение напряжения на внутреннем сопротивлении амперметра составляет  $3 \cdot 20 = 60$  мВ. При этом прямое смещение

диода составляет 0.6-0.7 В.

Исследование обратной ветви ВАХ необходимо осуществлять при больших температурах, т. к. исследуемый кремниевый диод КД212 при напряжении 15 В и комнатной температуре имеет обратный ток менее 1 мкА.

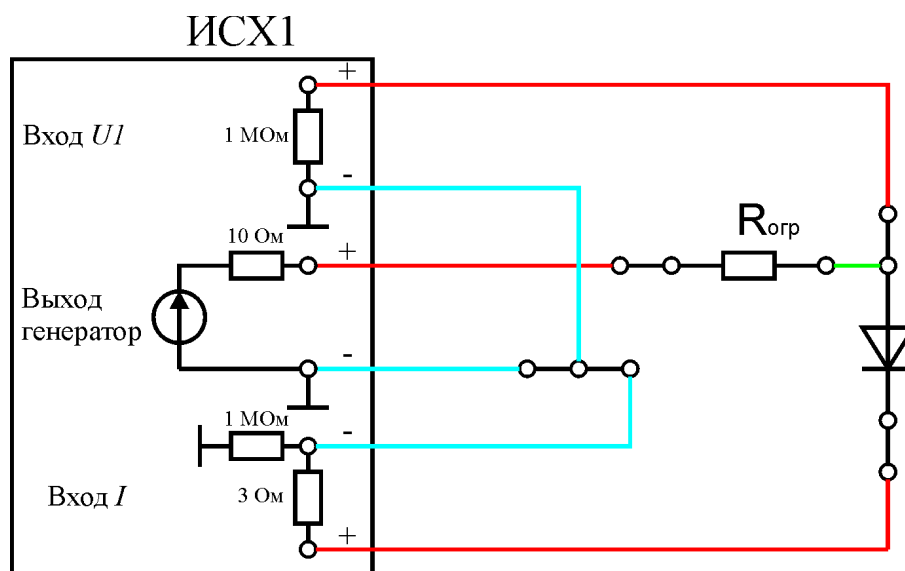


Рис. 7

### Рекомендуемое задание

1. Подключите стенд СЗ-ТТ03 к измерителю статических характеристик ИСХ1 (разъем на задней панели) и соберите электрическую схему рис.7.
2. Включите прибор. Установите на приборе тип генерируемого сигнала (пилообразный).
3. Установите амплитуду выходного сигнала.
4. Получите на экране измерителя изображение прямой ветви ВАХ  $U=f(I)$  диода при  $t=30^\circ\text{C}$  установив масштабные коэффициенты каналов  $I$  и  $UI$ .
5. Проведите аналогичные измерения при температурах,  $t=60^\circ\text{C}$ ,  $t=90^\circ\text{C}$  и  $t=120^\circ\text{C}$ .
6. Произведите аналогичные измерения для обратной ветви ВАХ при больших температурах  $t=90^\circ\text{C}$  и  $t=120^\circ\text{C}$ .