



### 020101. Температурная зависимость параметров диодов.

**Цель работы:** Исследовать температурную зависимость вольт-амперной характеристики германиевого и кремниевого диодов.

**Требуемое оборудование, входящее в состав модульного учебного комплекса МУК-Ф0Э1:**

- |   |       |
|---|-------|
| 1. Блок амперметра-вольтметра АВ1                 | 1 шт. |
| 2. Блок генератора напряжений ГНЗ                 | 1 шт. |
| 3. Стенд с объектами исследования СЗ-ТТ02         | 1 шт. |
| 4. Соединительные провода с наконечниками Ш4-Ш1.6 | 6 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.

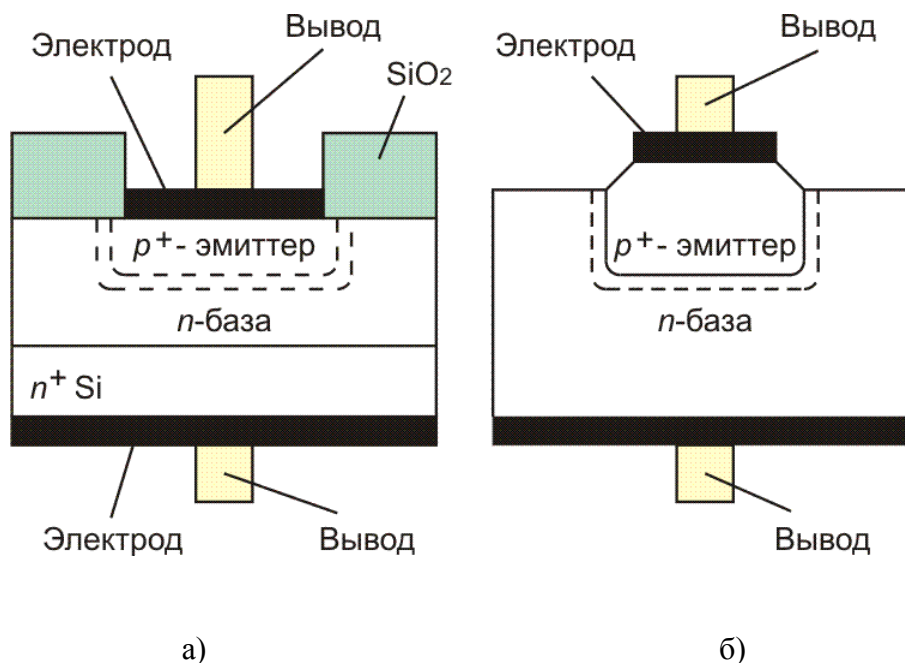


Рис. 1

### 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.

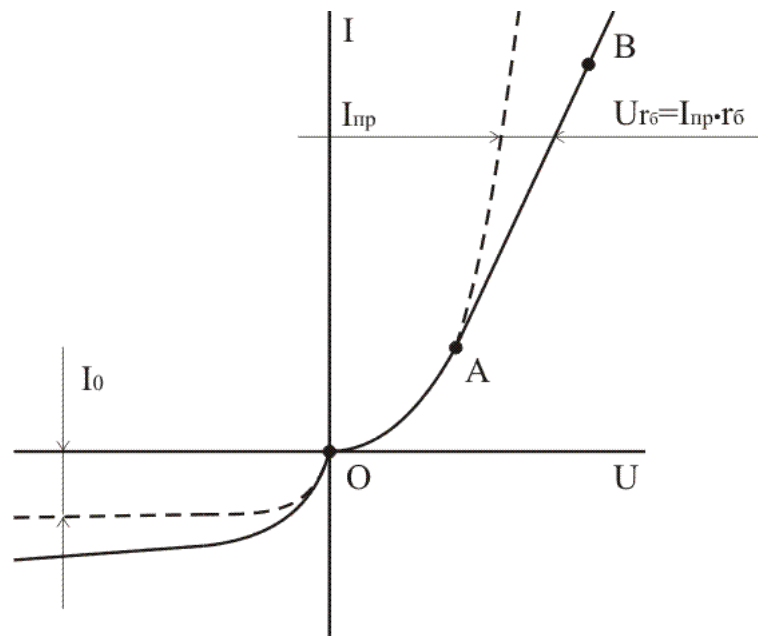


Рис. 2

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  $r_0$   $p-n$  перехода. Ток, протекая через  $r_0$ , создает падение напряжения:

$$U_{r_0} = I_{np} r_0 \quad (2)$$

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:

$$I_{np} = I_0 \left( \exp\left(\frac{U_{np} - r_0 I_{np}}{\varphi_T}\right) - 1 \right) \quad (3)$$

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 положе идет прямая ветвь ВАХ реального перехода. Как правило,  $p-n$  переходы с большими значениями  $r_{\delta}$  выполняются для увеличения допустимого рабочего обратного напряжения на  $p-n$  переходе.

В области обратных напряжений можно пренебречь падением напряжения в объеме полупроводника, т.к.  $r_{\delta}$  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:

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

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

Ток термогенерации  $I_{mг}$  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.

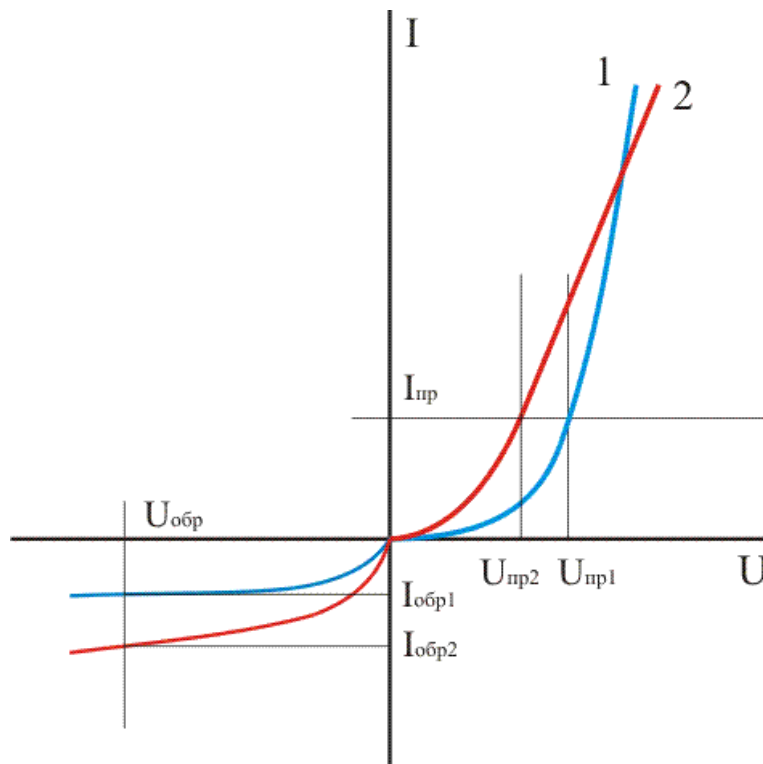


Рис. 3

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  $\varphi_k$ . В  $p-n$  переходе на основе германия  $\varphi_k = (0,3 \div 0,4)$  В, в  $p-n$  переходе на основе кремния  $\varphi_k = (0,6 \div 0,8)$  В. Поэтому прямая ветвь ВАХ кремниевого  $p-n$  перехода относительно германиевого смещается вправо на  $(0,3 \div 0,5)$  В.

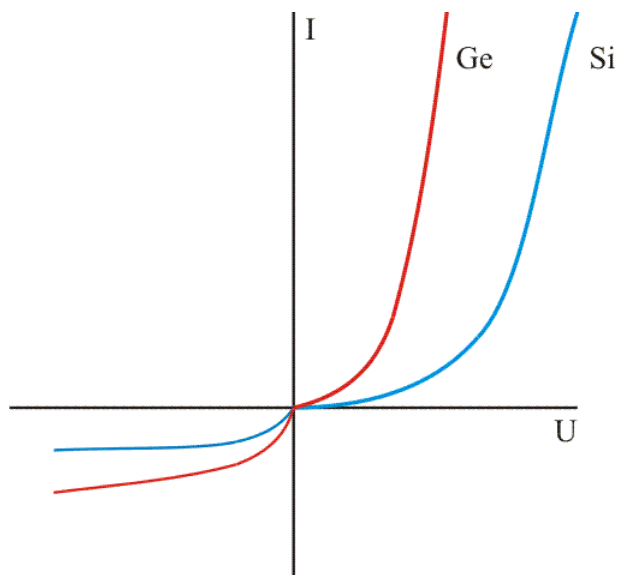


Рис. 4

Следует отметить, что **обратный ток кремниевых  $p-n$  переходов много меньше обратного тока германиевых  $p-n$  переходов**. Это связано с различием ширины запрещенной зоны:  $\Delta W_{z_{Ge}} = 0,72$  эВ;  $\Delta W_{z_{Si}} = 1,12$  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  $I_o$  в кремниевом  $p$ - $n$  переходе пренебрежимо мал.

Обратный ток германиевого  $p$ - $n$  перехода включает следующие составляющие:  $I_{обр\text{ Ge}} \approx I_o + I_y$ , а обратный ток кремниевый  $p$ - $n$  перехода -  $I_{обр\text{ Si}} \approx I_{тг} + I_y$ . 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 кремниевый  $p$ - $n$  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.  $I_{тг}$  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 кремниевый  $p$ - $n$  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

ВАХ при прямом включении диода имеет большую крутизну: при малом изменении прямого напряжения ток диода изменяется резко. Для экспериментального исследования ВАХ в этом случае проще и точнее устанавливать величину тока, а напряжение, полученное на диоде, измерять. Для этого в качестве источника необходимо применять «генератор тока» (рис. 5а), входящий в состав генератора напряжений ГНЗ.

ВАХ при обратном включении диода: даже при больших изменениях напряжения ток изменяется незначительно. В этом случае предпочтительнее использовать «генератор напряжений» для установки напряжения на диоде, а ток диода измерять (рис. 5б).

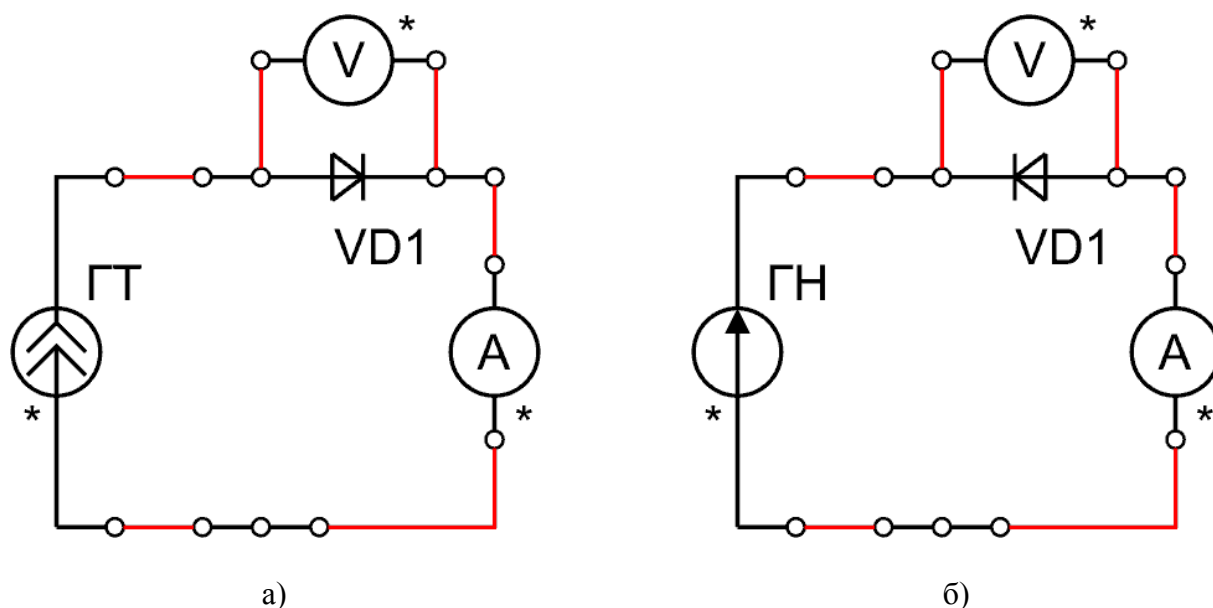


Рис. 5

### *Рекомендуемое задание*

1. Собрать установку по соответствующей схеме прямого, а затем обратного включения диода, указанной на рабочем месте.
2. Получить данные для построения прямой ветви ВАХ германиевого диода, задаваясь разными значениями прямого тока на  $IT$  и измеряя соответствующие значения прямого напряжения на диоде. Измерения проводить при различных значениях температуры. Рекомендуемые значения 300К, 360К, 390К.
3. Получить данные для построения обратной ветви ВАХ германиевого диода, задаваясь разными значениями обратного напряжения на  $IN$  и измеряя соответствующие значения обратного тока диода. Измерения проводить при различных значениях температуры. Рекомендуемые значения 300К, 360К, 390К.
4. Построить графики ВАХ для прямой и обратной ветвей.
5. Выполнить п. 2-4 для кремниевого диода.