

## Лабораторная работа 5.1

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

#### 5.1.1. Полупроводниковые диоды

Полупроводниковый диод – двухполюсный прибор, имеющий один  $p-n$ -переход. По функциональному назначению диоды делят на две группы: выпрямительные и специальные. Выпрямительные диоды предназначены для выпрямления переменного тока. В специальных типах полупроводниковых диодов используют различные свойства  $p-n$ -перехода: явление пробоя, барьерную емкость перехода и т. д.

Упрощенная структура диода показана на рис. 5.1.1, а, а его условное графическое изображение – на рис. 5.1.1, б. Электрод диода, подключенный к  $p$ -области, называют *анодом* (А), а электрод, подключенный к  $n$ -области – *катодом* (К). Если анод положителен по отношению к катоду, то на диод подано прямое смещение; ток диода при этом называют *прямым*. При обратном смещении катод более положителен, чем анод. Обратный ток при этом ограничен малым током насыщения.

Полупроводниковые диоды выполняют на основе несимметричных  $p-n$ -переходов. В этом случае в одной из областей концентрация примеси, определяющей вид проводимости, значительно больше, чем в другой области. Область с высокой концентрацией примеси называют *эмиттером*. Функции эмиттера может выполнять как катод, так и анод. Область с низкой концентрацией примесей называют *базой*. База имеет значительно большее объемное сопротивление, чем эмиттер.

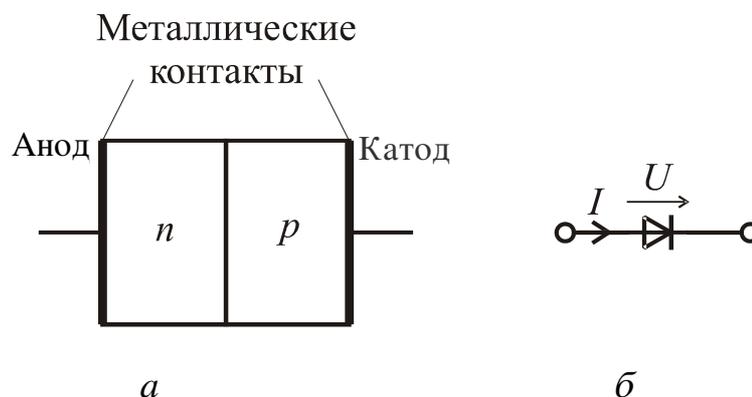


Рис. 5.1.1

Идеальная ВАХ диода описывается выражением

$$I = I_0 \left( e^{U/V_t} - 1 \right). \quad (5.1.1)$$

здесь  $V_t$  – температурный потенциал,  $I_0$  – обратный ток насыщения. Величина  $I_0$  зависит от типа полупроводника и размеров диода. У маломощных кремниевых диодов ток  $I_0$  имеет порядок  $10^{-15}$  А. Обратный ток кремниевых диодов на 1–2 порядка меньше, чем германиевых. Кроме того, обратный ток диода зависит от температуры. При увеличении температуры он увеличивается примерно в два раза у германиевых и в 2.5 раза у кремниевых диодов на каждые  $10^\circ\text{C}$ .

Максимально допустимое увеличение обратного тока диода определяет максимальную температуру, которая составляет  $80 - 100^\circ\text{C}$  для германиевых диодов и  $150 - 200^\circ\text{C}$  для кремниевых.

Дифференциальное сопротивление диода равно отношению приращения напряжения на диоде к вызванному им приращению тока:

$$R_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI}.$$

Из формулы (5.1.1) следует, что

$$R_{\text{диф}} \approx \frac{V_t}{I}$$

*Пробой p–n-перехода.* Обратный ток диода не изменяется, пока обратное напряжение не достигнет значения  $U_{\text{пр}}$ . Это так называемое *напряжение пробоя*, при котором наступает пробой p–n -перехода. После начала пробоя незначительное увеличение обратного напряжения сопровождается резким увеличением тока.

В основе пробоя p–n-перехода лежат следующие явления:

- 1) туннельный пробой (эффект Зенера);
- 2) лавинный пробой;
- 3) тепловой пробой.

*Туннельный пробой* наблюдается тогда, когда напряженность электрического поля такова, что становится возможным туннельный переход из валентной зоны полупроводника с электропроводностью одного типа в зону полупроводника с электропроводностью другого типа. Как правило, туннельный пробой наблюдается при напряжениях ниже 6 В.

*Лавинный пробой* обусловлен образованием носителей заряда из-за ударной ионизации атомов полупроводника. Если напряженность электрического поля достаточно велика, то электроны приобретают энергию, достаточную для того, чтобы выбивать другие электроны из атомов

кристаллической решетки. Этот процесс приводит к быстрому (лавинному) нарастанию обратного тока.

*Тепловой пробой* происходит при нагреве перехода. За счет тепловой энергии происходит генерация пар электрон – дырка. Это приводит к увеличению обратного тока и дальнейшему увеличению температуры. Процесс нарастает лавинообразно и приводит к изменению структуры кристалла, выводя его из строя.

*Параметры выпрямительных диодов.* Перечислим основные параметры выпрямительных диодов, приводимые в справочной литературе.

1. Максимально допустимое обратное напряжение диода  $U_{обр. max}$  – значение обратного напряжения, которое диод может выдержать в течение длительного времени без нарушения работоспособности. У маломощных диодов  $U_{обр. max}$  может изменяться от нескольких десятков до нескольких тысяч вольт.

2. Средний выпрямленный ток диода  $I_{cp}$  – среднее за период значение выпрямленного тока.

3. Средний обратный ток диода  $I_{обр. cp}$  – среднее за период значение обратного тока.

4. Средняя рассеиваемая мощность диода  $P_{cp}$  – средняя за период мощность, рассеиваемая диодом. У маломощных диодов  $P_{cp}$  может изменяться от сотен милливольт до нескольких десятков ватт.

5. Дифференциальное сопротивление диода  $R_{диф}$  – отношение приращения напряжения к малому приращению тока. Дифференциальное сопротивление может изменяться от единиц до нескольких сотен Ом.

### 5.1.2. Стабилитроны

*Стабилитрон* – полупроводниковый диод, работающий в режиме управляемого лавинного пробоя. В зависимости от удельного сопротивления базы в стабилитроне может иметь место и туннельный, и лавинный, и смешанный пробой.

Стабилитроны изготавливают из кремния, обеспечивающего необходимую форму вольт-амперной характеристики. Германиевые диоды для стабилизации напряжения непригодны, так как электрический пробой у них легко переходит в тепловой.

Условное графическое изображение стабилитрона и его вольт-амперная характеристика показаны на рис. 5.1.2.

Прямая ветвь ВАХ стабилитрона имеет такой же вид, как и у кремниевого диода. У стабилитронов рабочей является обратная ветвь ВАХ. Она имеет излом и вслед за ним – круто падающий линейный участок. Поэтому при изменении тока в широких пределах напряжение на приборе

практически не изменяется. Это свойство стабилитрона позволяет использовать его в качестве стабилизатора напряжения.

Поскольку электрический пробой наступает при сравнительно низком обратном напряжении, мощность, выделяющаяся в  $p-n$ -переходе, будет небольшой, что предохраняет переход от теплового (необратимого) пробоя. Ток стабилитрона колеблется в пределах от единиц миллиампер до нескольких ампер. Рабочее напряжение стабилитрона, являющееся напряжением пробоя  $p-n$ -перехода, лежит в пределах от единиц до нескольких десятков вольт.

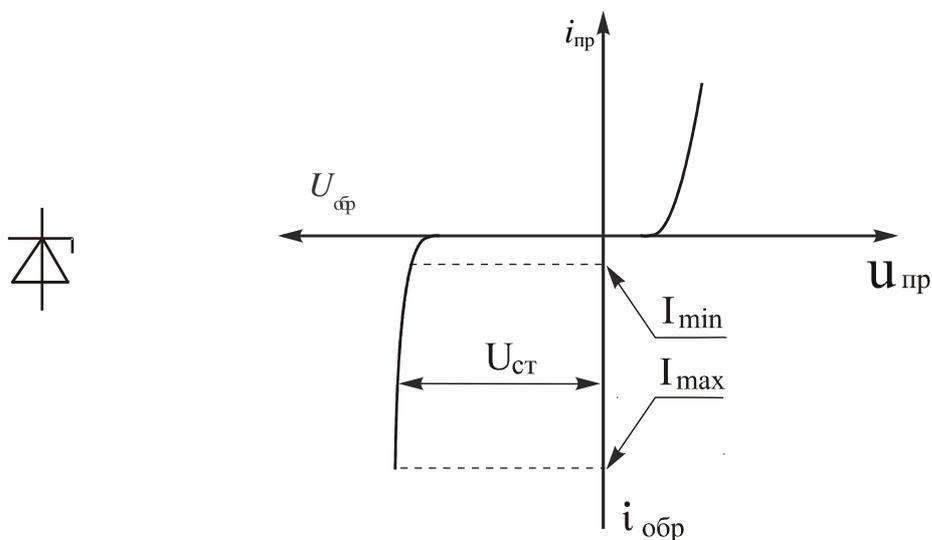


Рис. 5.1.2

Основное применение кремниевых стабилитронов – стабилизация выпрямленного напряжения.

Приведем основные параметры стабилитронов, указываемые в справочной литературе.

1. Напряжение стабилизации  $U_{ст}$  – напряжение на стабилитроне при заданном токе стабилизации (в режиме пробоя).

2. Максимально допустимая мощность, рассеиваемая на стабилитроне, – наибольшая мощность, выделяющаяся в  $p-n$ -переходе, при которой не происходит тепловой пробой перехода. Она составляет от сотен милливатт до единиц ватт.

3. Максимальный ток стабилизации  $I_{ст\ max}$  – наибольшее значение тока, при котором мощность, рассеиваемая на стабилитроне, не превышает допустимого значения. Значение  $I_{ст\ max}$  может составлять от нескольких миллиампер до нескольких ампер.

4. Минимальный ток стабилизации  $I_{ст\ min}$  – минимальный ток, при котором возникает устойчивый пробой.

5. Дифференциальное сопротивление  $R_{диф}$  – отношение приращения напряжения к приращению тока в режиме стабилизации:

$$R_{\text{ст}} = \frac{\Delta U_{\text{ст}}}{\Delta I_{\text{ст}}}.$$

Дифференциальное сопротивление может быть от единиц Ом для низковольтных стабилизаторов до сотен Ом для стабилизаторов на более высокие напряжения.

5. Температурный коэффициент напряжения стабилизации – относительное изменение напряжения стабилизации при изменении температуры окружающей среды на 1 °С:

$$\alpha_{\text{ст}} = \frac{\Delta U_{\text{ст}}/U_{\text{ст}}}{\Delta T}.$$

Здесь  $\alpha_{\text{ст}}$  может принимать значения от  $10^{-5}$  до  $10^{-3}$  К<sup>-1</sup>.

### Рекомендуемая литература

1. Гусев В.Г. Электроника и микропроцессорная техника: Учеб. для вузов / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2004. – 790 с.
2. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: Учеб. пособие для вузов / И.П. Степаненко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2003. – 488 с.: ил.
3. Довгун, В. П. Электротехника и электроника: учеб. пособие: в 2-х ч. Ч. 2 / В. П. Довгун. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – 252 с.