

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО
Институт компьютерных наук и кибербезопасности
ВШ КТиИС

**Исследование характеристик диодов, стабилитрона
и параметрического стабилизатора**

**Методические указания к лабораторным работам по дисциплине
«Электроника и схемотехника»**

Санкт-Петербург
2025

Характеристики и параметры диодов

Диоды представляют собой полупроводниковый элемент с электронно-дырочным p - n переходом или переходом металл–полупроводник (диоды Шоттки) и двумя выводами: анодом (А) и катодом (К).

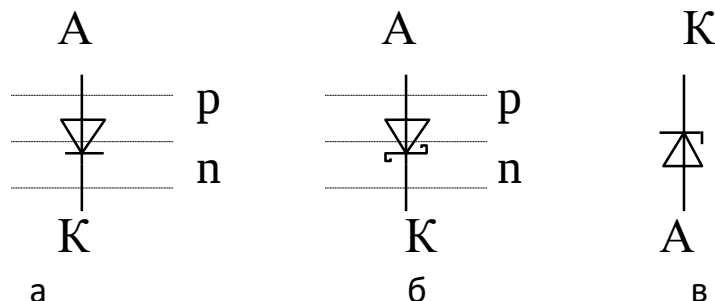


Рис. 1.1. Условное графическое обозначение (УГО) и структура диодов p - n (а), Шоттки (б) и УГО стабилитрона (в)

Обычно зоны p и n изготавливаются из кремния (Si). В диодах Шоттки зона p заменена слоем металла. Диоды проводят ток I_D преимущественно в одном направлении от анода к катоду. Основная характеристика – вольтамперная (ВАХ) $I_D = f(U_D)$ – зависимость тока диода от приложенного к нему напряжения, определяется типом перехода и температурой, имеет существенную нелинейность.

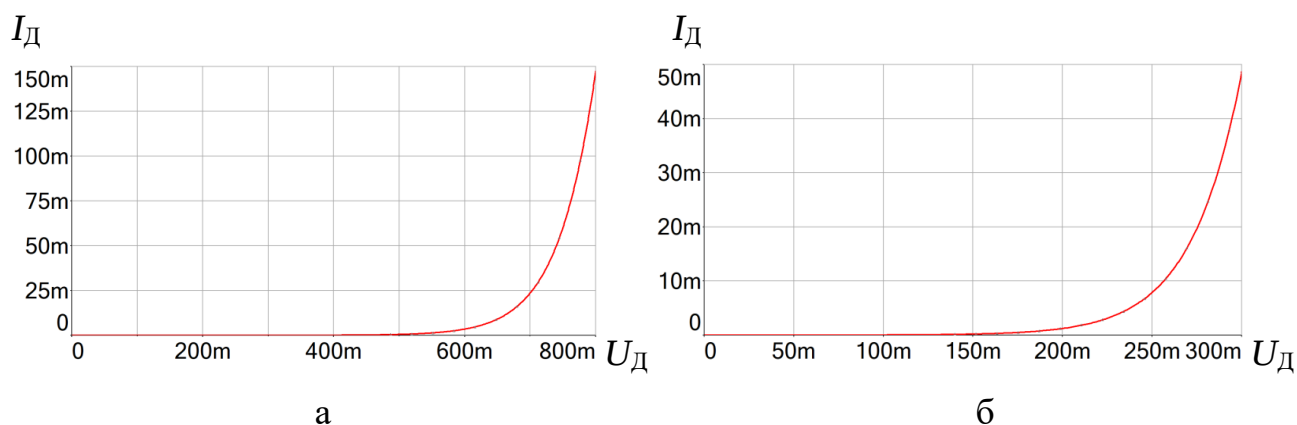


Рис. 1.2. Типовые ВАХ прямой ветви кремниевого диода (а) и диода Шоттки (б)

При $U_A - U_K = U_D > 0$ диод работает в области проводимости на прямой ветви ВАХ (рис. 1.2). Прямой ток I_D зависит экспоненциально от напряжения U_D . У p - n диодов I_D резко увеличивается при $U_D = (0,6 \div 0,7)$ В, а у диодов Шоттки – при более низком $U_D = (0,2 \div 0,3)$ В. В области проводимости диода при средних

токах *прямое* напряжение U_D меняется мало благодаря крутому подъему характеристики.

При $U_D < 0$ диод работает в *области запирания* на *обратной* ветви ВАХ (рис. 1.3а). Обратный ток I_D мал, во многих случаях применения диода им можно пренебречь. Однако, при увеличении отрицательного U_D происходит *пробой* диода, сопровождающийся резким возрастанием обратного тока. Пробой может носить обратимый характер как в стабилитроне, так и необратимый, например, тепловой, который приводит к выходу диода из строя. Значение напряжения пробоя зависит от типа диода.

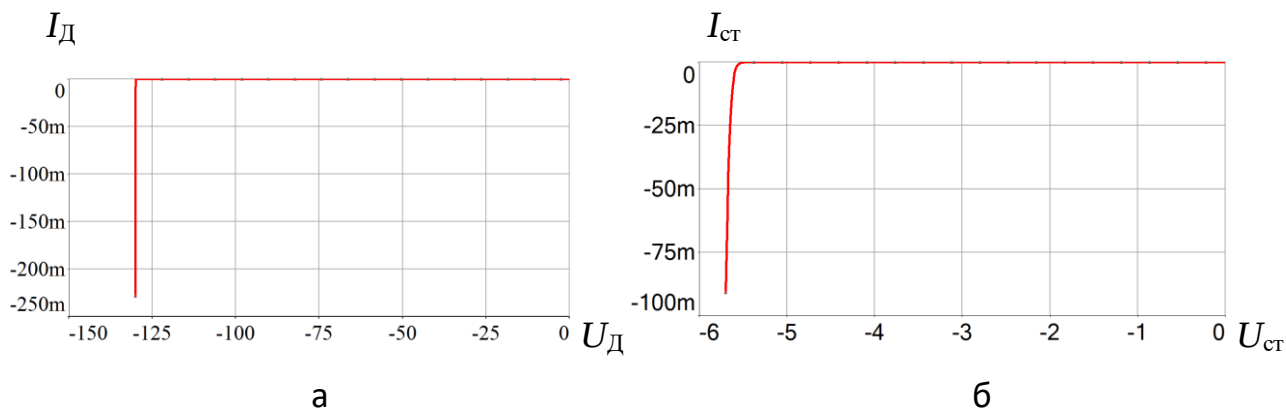


Рис. 1.3. Типовая ВАХ обратной ветви диода (а) и ВАХ низковольтного стабилитрона (б)

ВАХ p - n перехода диода при $U_D \geq 0$ описывает уравнение:

$$I_D = I_s \left(e^{\frac{U_D}{nU_t}} - 1 \right) \approx I_s e^{\frac{U_D}{nU_t}}, \quad U_D \gg U_t, \quad (1.1)$$

где $I_s \approx 10^{-12} \div 10^{-6} \text{ A}$ – ток насыщения; U_D – напряжение на диоде; $n = 1 \div 2$ – коэффициент эмиссии; U_t – температурное напряжение, $U_t(T) \approx 26 \text{ mV}$ при комнатной температуре.

Из (1.1) следует зависимость напряжения U_D от тока I_D . В силовых диодах при больших токах I_D следует учитывать падение напряжения на внутреннем сопротивлении R_B , складывающееся с напряжением на p - n переходе:

$$U_D \approx nU_T \ln \left(\frac{I_D}{I_s} \right) + I_D R_B, \quad (1.2)$$

Определить неизвестные значения величин I_S и n на основе соотношений (1.1) или (1.2), принимая $R_B = 0$, можно, если экспериментально снять не менее 2-х точек ВАХ с параметрами $U_{Д1}$, $I_{Д1}$ и $U_{Д2}$ и $I_{Д2}$:

$$I_S = \text{EXP} \left[\left(\frac{U_{Д2}}{U_{Д1}} \ln I_{Д1} - \ln I_{Д2} \right) / \left(\frac{U_{Д2}}{U_{Д1}} - 1 \right) \right], \quad (1.3)$$

$$n = \frac{U_{Д2}}{U_t} \left[\ln \frac{I_{Д2}}{I_S} \right]^{-1}, \quad (1.4)$$

Режим, при котором внешние сигналы приводят к малым изменениям положения рабочей точки диода, заданной величинами $U_{Д0}$ и $I_{Д0}$, называют режимом малых сигналов. В этом случае значимым параметром является дифференциальное или динамическое сопротивление диода r_D . Из (1.2) следует:

$$r_D = \left. \frac{dU_D}{dI_D} \right|_{I_{Д0}} \approx \frac{nU_T}{I_{Д0}}, \quad I_S \ll I_{Д0} \quad (1.5)$$

Используя экспериментальные данные определяют r_D по приращениям величин на небольших интервалах ВАХ:

$$r_D = \left. \frac{\Delta U_D}{\Delta I_D} \right|_{I_{Д0}}, \quad (1.6)$$

где $I_{Д0}$ – среднее значение тока на интервале $\Delta I_{Д0}$.

Характеристики и параметры стабилитрона и параметрического стабилизатора

Стабилитрон — это полупроводниковый диод, в отличие от обычного диода, предназначенный для работы в режиме пробоя, на обратной ветви ВАХ, при обратном напряжении $U_{обр}$. При малых $U_{обр}$ стабилитрон ведёт себя как обычный диод и практически не пропускает ток. При достижении $U_{обр}$ определённого порога происходит туннельный или лавинный пробой, ток резко возрастает, а напряжение на стабилитроне остаётся практически постоянным, независимо от изменений тока, что позволяет использовать его для стабилизации и ограничения напряжения в цепях постоянного тока. Типовая ВАХ низковольтного стабилитрона приведена на рис. 1.36.

Основные параметры стабилитрона:

- *напряжение стабилизации* $U_{ст}$ — среднее значение $U_{обр}$ на стабилитроне при изменении тока $I_{ст}$ от $I_{ст\ min}$ до $I_{ст\ max}$;
- *минимальный ток стабилизации* $I_{ст\ min}$ — минимальный ток, при котором стабилитрон сохраняет способность стабилизировать напряжение;
- *максимальный ток стабилизации* $I_{ст\ max}$ — ток, при превышении которого может возникнуть необратимый тепловой пробой и стабилитрон сгорит;
- *динамическое (дифференциальное) сопротивление* r_d — характеризует наклон обратной ветви ВАХ.

Для хорошей стабилизации r_d должно быть как можно меньше, т.к. его наличие приводит к тому, что на участке стабилизации $U_{ст}$ будет зависеть от изменений $I_{ст}$:

$$U_{ст} = U_{ст0} \pm \Delta I_{ст} r_d \quad (1.7)$$

где $U_{ст0}$ — напряжение стабилизации при заданном значении $I_{ст0}$.

Значение r_d может изменяться в широких пределах, т.к. зависит обратно пропорционально от $I_{ст0}$. Экспериментально r_d определяют на заданном участке ВАХ по соответствующим приращениям тока $\Delta I_{ст}$ и напряжения $\Delta U_{ст}$:

$$r_d = \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}}, \quad (1.8)$$

Параметрический стабилизатор напряжения на основе стабилитрона VD7 (рис. 1.4б) содержит резистор, ограничивающий токи схемы R_{B1} (при $R_k = 0$) и нагрузку R_{H1} .

Основные характеристики стабилизатора:

Выходное напряжение $U_H = U_{ст}$ равно напряжению стабилизации VD7.

Коэффициент стабилизации напряжения $K_{ст}$ показывает во сколько раз относительные изменения U_H меньше относительных изменений U_H . Чем выше $K_{ст}$, тем лучше стабилизатор сглаживает колебания U_H . Экспериментальное $K_{ст\ э}$ и расчетное $K_{ст\ р}$ значения коэффициентов:

$$K_{\text{ст } \varepsilon} = \frac{\Delta U_{\text{п}}/U_{\text{п}}}{\Delta U_{\text{н}}/U_{\text{н}}}, \quad K_{\text{ст } \rho} \approx \frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{п}}} \frac{RB1}{r_{\text{д}}}. \quad (1.9)$$

Выходное сопротивление $r_{\text{вых}} \approx r_{\text{д}}$, чем оно меньше, тем выше $K_{\text{ст}}$ и меньше влияние изменений сопротивления $R_{\text{н1}}$ на изменения $U_{\text{н}}$. Экспериментально $r_{\text{вых}}$ определяют по соответствующим приращениям тока $\Delta I_{\text{н}}$ и напряжения $\Delta U_{\text{н}}$ при изменении $R_{\text{н1}}$:

$$r_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_{\text{н}}}{\Delta I_{\text{н}}}, \quad (1.10)$$

Коэффициент полезного действия (КПД) равен отношению мощности в нагрузке $P_{\text{н}}$ к потребляемой мощности $P_{\text{п}}$:

$$\text{КПД} = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{п}}} \cdot 100\% = \frac{U_{\text{н}} I_{\text{н}}}{U_{\text{п}} I_{\text{п}}} \cdot 100\% \quad (1.11)$$

Идеальное устройство поддерживает постоянное выходное напряжение $U_{\text{н}} = \text{const}$ на нагрузке $R_{\text{н1}}$ при ее изменении или изменении входного напряжения $U_{\text{п}}$. В реальном стабилизаторе изменения $U_{\text{п}}$ и $R_{\text{н1}}$ влияют на значение $U_{\text{н}}$. Увеличение $U_{\text{п}}$ приводит к увеличению тока потребления $I_{\text{п}}$ и тока стабилизатора $I_{\text{ст}}$ при неизменном токе $I_{\text{н}}$:

$$I_{\text{ст}} = I_{\text{п}} - I_{\text{н}} = \frac{U_{\text{п}} - U_{\text{н}}}{RB1} - \frac{U_{\text{н}}}{R_{\text{н1}}}. \quad (1.12)$$

Следовательно, падает КПД, но улучшаются стабилизирующие свойства стабилизатора т.к. за счет увеличения $I_{\text{ст}}$ уменьшается $r_{\text{вых}}$ и растет $K_{\text{ст}}$.

Аналогичный эффект наблюдается при увеличении сопротивления нагрузки $R_{\text{н1}}$.

Порядок выполнения работы

Снятие ВАХ диодов

Исследуемые элементы расположены в модуле «Диоды», схема эксперимента приведена на рис. 1.4а.

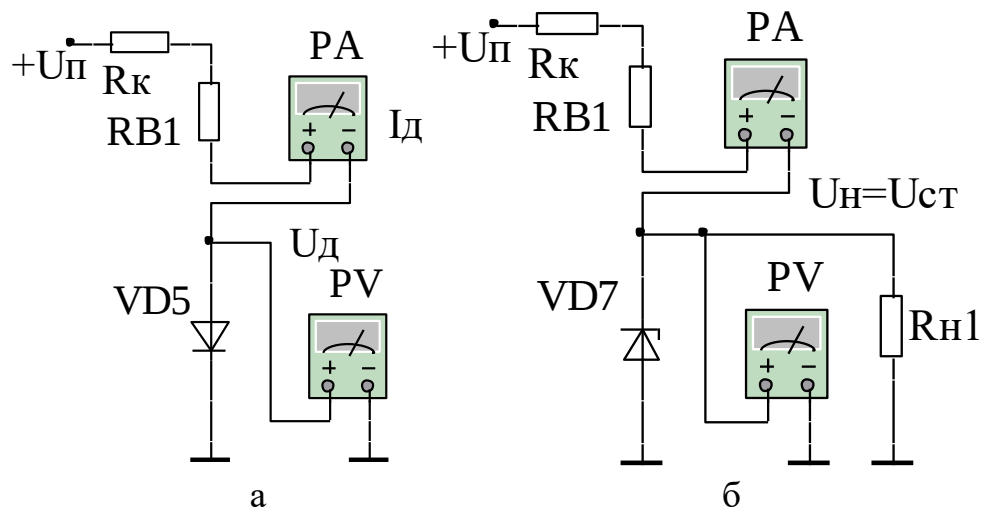


Рис. 1.4. Схема снятия прямой ветви ВАХ диода (а), схема снятия рабочей ветви ВАХ стабилитрона и исследования параметрического стабилизатора (б)

Снимают только прямую ветвь ВАХ диодов, т.к. малые обратные токи измерить имеющимися приборами не удастся. Последовательно с *p-n* диодом VD5 включают амперметр PA, ограничительный резистор RB1, дополнительный резистор R_k из модуля «Транзисторы» и подключают узел $+U_{\text{п}}$ к регулируемому источнику 0...12 В модуля «Питание». В качестве вольтметра PV используют мультиметр.

Эксперимент проводят в два этапа, при малых и больших токах диода I_d .

1. В качестве амперметра PA используют аналоговый PA1 из модуля «Измерители», устанавливают сопротивление резистора $R_k = 5 \text{ кОм}$ и задают напряжения $+U_{\text{п}}$, изменяя ток через диод I_d в пределах $(0,05 \div 1) \text{ мА}$.

2. В качестве PA используют «Измеритель универсальный» в режиме амперметра, резистор R_k удаляют из схемы и задают напряжения $+U_{\text{п}}$ увеличивая ток через диод I_d от 2 мА и до максимально возможного значения.

В обоих случаях во всех точках измеряют значения I_d и напряжения U_d на диоде, а результаты фиксируют в табл. 1.1. Следует правильно выбрать предел измерения мультиметра, обеспечивающий разрешение 1 мВ.

Таблица 1.1

ВАХ диода VD5 (VD6)

I_D , мА	0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	40	60	80
U_D , В												
$r_{DЭ}$, Ом												
$r_{DР}$, Ом												

Эксперимент аналогичный описанному выше проводят для диода Шоттки VD6.

Определяют параметры ВАХ диодов:

- значение I_S по формуле (1.3) и точкам $I_{D1} = 10$ мА, $I_{D2} = 80$ мА;
- значение n по формуле (1.4).

Определяют динамические сопротивления диодов на разных участках ВАХ:

- расчетные $r_{DР}$ по формуле (1.5), используя полученное значение n .
- экспериментальные $r_{DЭ}$ по формуле (1.6);

Для VD5 и VD6 строят ВАХ диодов $I_D = f(U_D)$ в двух видах:

- с линейным масштабом по осям U_D и I_D ;
- с линейным масштабом по оси U_D и логарифмическим по оси I_D .

На одноименных графиках приводят ВАХ на основе таблиц экспериментов и ВАХ рассчитанные по формуле (1.1) с полученными значениями I_S и n .

Снятие ВАХ стабилитрона

Используют схему 1.4б, амперметр РА – «Измеритель универсальный» выполняет контрольные функции при больших токах стабилитрона, ограничительный резистор RB1, дополнительный резистор R_K из модуля «Транзисторы» подключают к узлу $+U_P$ регулируемого источника 0...12 В модуля «Питание». В качестве вольтметра PV используют мультиметр. Резистор нагрузки R_{H1} , подключен параллельно стабилитрону.

Эксперимент проводят в два этапа, при малых и больших токах стабилитрона I_{CT} , в режиме холостого хода (х.х.) при $R_{H1} = \infty$.

1. Снимают ВАХ стабилитрона VD7 при малых токах. Устанавливают сопротивление резистора $R_k = 3$ кОм, задают значения напряжения $+U_{\text{п}}$, в соответствии с табл. 1.2 и измеряют напряжения $U_{\text{ст}}$.

2. Снимают ВАХ стабилитрона VD7 при больших токах. Удаляют из схемы резистор R_k ($R_k = 0$), задают значения напряжения $+U_{\text{п}}$, в соответствии с табл. 1.2 и измеряют напряжения $U_{\text{ст}}$.

3. Ток стабилитрона VD7 рассчитывают по формуле:

$$I_{\text{ст}} = \frac{U_{\text{п}} - U_{\text{ст}}}{RB1 + R_k}.$$

Таблица 1.2

ВАХ стабилитрона VD7.

R_k , кОм	3						0					
$U_{\text{п}}$, В	5	6	7	8	9	12	5	6	7	8	9	12
$U_{\text{ст}}$, В												
$I_{\text{ст}}$, мА												

По результатам эксперимента строят ВАХ стабилитрона и определяют:

- значения минимальных токов $I_{\text{ст min}}$ при которых уменьшение напряжения не более 1 % и 3 % по отношению к максимальному $U_{\text{ст}}$;
- средние значения динамического сопротивления стабилитрона на участках стабилизации 1 % и 3 %.

Исследование параметрического стабилизатора

1. В схеме рис. 1.4б удаляют резистор R_k , источник $+U_{\text{п}}$ подключают к резистору RB1, в качестве РА используют «Измеритель универсальный» в режиме амперметра для измерения потребляемого тока $I_{\text{п}}$. Напряжение $U_{\text{н}}$ измеряют мультиметром.

2. Исследование влияния напряжения питания $U_{\text{п}}$ на параметры стабилизатора проводят при $R_{\text{н1}} = 400$ Ом, результаты измерений заносят в табл. 1.3. Для расчета $I_{\text{н}}$, $I_{\text{ст}}$, $P_{\text{п}}$, $P_{\text{н}}$, КПД используют формулы (1.11), (1.12).

3. По формуле (1.9) рассчитывают значения $K_{\text{ст } \varepsilon}$ в диапазонах изменения напряжения $U_{\text{п}}$ ($7 \div 8$) В, ($9 \div 10$) В, ($11 \div 12$) В, принимая за $U_{\text{п}}$ конец диапазона.

Таблица 1.3

Влияние напряжения питания $U_{\text{п}}$ на параметры стабилизатора

$U_{\text{п}}, \text{ В}$	$U_{\text{н}}, \text{ В}$	$I_{\text{п}}, \text{ мА}$	$I_{\text{н}}, \text{ мА}$	$I_{\text{ст}}, \text{ мА}$	$P_{\text{п}}, \text{ мВт}$	$P_{\text{н}}, \text{ мВт}$	КПД, %	$K_{\text{ст } \varepsilon}$
7								
8								
9								
10								
11								
12								

4. Исследование влияния сопротивления нагрузки $R_{\text{н1}}$ на параметры стабилизатора проводят при $U_{\text{п}} = 9 \text{ В}$, результаты измерений заносят в табл. 1.4.

5. По формуле (1.10) рассчитывают значения $r_{\text{вых}}$ в диапазонах изменения $R_{\text{н1}}$ ($200 \div 400$) Ом, ($400 \div 800$) Ом и ($800 \div \infty$) Ом.

Таблица 1.4

Влияние сопротивления нагрузки $R_{\text{н1}}$ на параметры стабилизатора

$R_{\text{н1}}, \text{ Ом}$	$U_{\text{н}}, \text{ В}$	$I_{\text{п}}, \text{ мА}$	$I_{\text{н}}, \text{ мА}$	$I_{\text{ст}}, \text{ мА}$	$P_{\text{п}}, \text{ мВт}$	$P_{\text{н}}, \text{ мВт}$	КПД, %	$\Delta U_{\text{н}}, \text{ В}$	$\Delta I_{\text{н}}, \text{ мА}$	$r_{\text{вых}}, \text{ Ом}$
∞										
1000										
800										
600										
400										
300										
200										

6. Строят графики зависимостей $K_{\text{ст } \varepsilon} = f(U_{\text{п}})$, $\text{КПД} = f(U_{\text{п}})$, $\text{КПД} = f(R_{\text{н1}})$, $r_{\text{вых}} = f(R_{\text{н1}})$.

В выводах по работе приводится оценка результатов проделанной работы: соответствие экспериментальных и теоретических ВАХ, значений параметров исследованных устройств.