

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТАБИЛИТРОНОВ

Цель работы: изучить принцип действия и характеристики полупроводниковых стабилитронов. Исследовать работу стабилитрона на примере схемы параметрического стабилизатора напряжения.

Основные теоретические сведения

Полупроводниковые стабилитроны предназначены для стабилизации напряжения. Их работа основана на использовании явления электрического пробоя *p-n* перехода при включении диода в обратном направлении.

1. Пробой *p-n* перехода

При рабочих величинах обратного напряжения протекает малый обратный ток *p-n* перехода, однако при превышении определенного уровня этого напряжения обратный ток *p-n* перехода быстро увеличивается. Это явление называется *пробоем p-n* перехода.

Различают два вида пробоя: электрический и тепловой.

Тепловой пробой вызывает разрушение *p-n* перехода, т.е. носит необратимый характер. К *электрическим пробоям* относятся туннельный, лавинный и поверхностный они носят обратимый характер.

В основе туннельного пробоя лежит *туннельный эффект*, т.е. "просачивание" электронов сквозь потенциальный барьер, высота которого больше, чем энергия носителей заряда. При этом электроны проходят через потенциальный барьер, не изменяя своей энергии, попадая из валентной зоны полупроводника с электропроводностью одного типа в зону проводимости полупроводника с электропроводностью другого типа (рис.2.1).

Туннельный пробой возникает в полупроводниках, имеющих узкий переход и малое значение удельного сопротивления. При этом напряженность электрического поля должна быть достаточно высокой, для искривления энергетических зон полупроводника

настолько, что энергия электронов полупроводника p -типа в валентной зоне становится такой же, как и энергия свободных электронов зоны проводимости полупроводника n -типа.

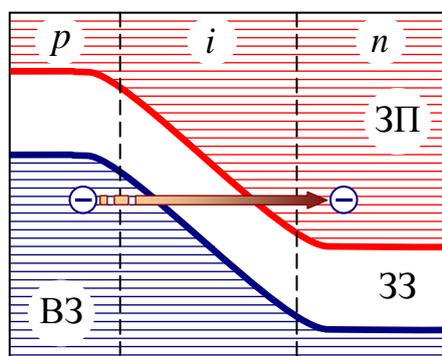


Рисунок 2.1 – Зонная диаграмма туннельного пробоя

Для получения туннельного эффекта используют полупроводниковый материал с очень большой концентрацией примесей (до 10^{21} атомов на 1 см^3). Полупроводники с таким содержанием примесей называют вырожденными, а их свойства близки к свойствам металлов.

Лавинный пробой вызывается ударной ионизацией, которая происходит тогда, когда напряженность электрического поля, вызванная обратным напряжением, достаточно велика. Неосновные носители заряда, движущиеся через p - n переход, ускоряются настолько, что при столкновении с атомами могут разорвать валентную связь (т.е. ионизируют их). В результате появляется пара электрон-дырка. Вновь появившиеся носители заряда ускоряются электрическим полем и, в свою очередь, могут вызвать ионизацию следующего атома и т.д. Если процесс ударной ионизации идет лавинообразно, то по тому же закону увеличивается количество носителей заряда и обратный ток.

При лавинной ионизации ток в цепи ограничен только внешним сопротивлением. При лавинном пробое падение напряжения на p - n переходе остается постоянным в широком диапазоне изменения обратного тока.

Лавинный пробой возникает в высокоомных полупроводниках, имеющих достаточно большую ширину p - n перехода, достаточную для разгона носителей заряда.

2. Стабилизатор напряжения

По сравнению с выпрямительными диодами стабилитрон имеет достаточно низкое регламентированное напряжение пробоя и может поддерживать (стабилизировать) это напряжение на постоянном уровне при значительном изменении обратного тока (рис.2.2). Напряжение, при котором наступает пробой и происходит резкое увеличение тока называется *напряжением стабилизации* $U_{ст}$.

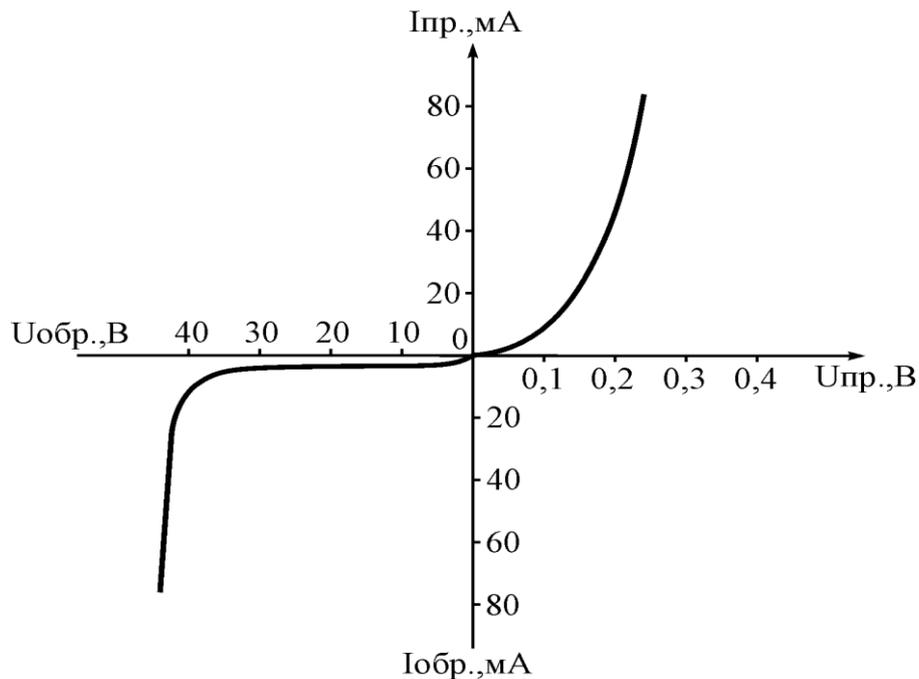


Рисунок 2.2 – Вольт-амперная характеристика стабилитрона

Материалы, используемые для создания $p-n$ перехода стабилитронов, имеют высокую концентрацию примесей. Поэтому напряженность электрического поля в $p-n$ переходе значительно выше, чем у обычных диодов. При относительно небольших обратных напряжениях в $p-n$ переходе возникает сильное электрическое поле, вызывающее электрический пробой.

Механизм пробоя может быть лавинным, туннельным или смешанным. У стабилитронов до напряжения 5,6 В преобладает туннельный пробой, выше 5,6 В доминирует лавинный пробой.

Наиболее часто стабилитроны используются в схемах стабилизации напряжения (рис.2.3). Если входное напряжение $U_{вх}$ увеличивается, ток стабилизации $I_{ст}$ возрастает, а падение напряжения на стабилитроне и на нагрузке $U_{н}$ остается

неизменным. При увеличении тока через стабилитрон увеличивается и суммарный входной ток $I_{\text{вх}}$, что приводит к росту падения напряжения на сопротивлении $R_{\text{б}}$. Другими словами, почти все приращение напряжения питания падает на сопротивлении $R_{\text{б}}$, а выходное напряжение остается неизменным за счет характеристики обратной ветви стабилитрона

$$\Delta U_{\text{вх}} = \Delta I_{\text{вх}} \cdot R_{\text{б}}.$$

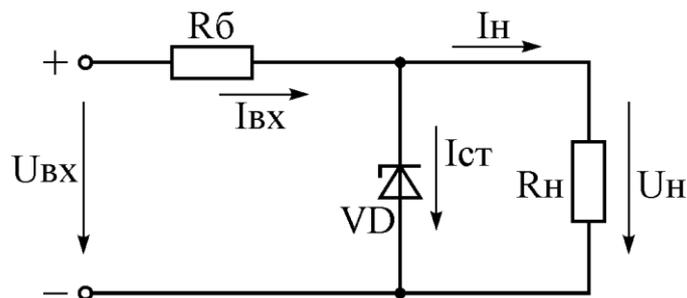


Рисунок 2.3 – Схема параметрического стабилизатора напряжения

Величина балластного сопротивления определяется из уравнения состояния электрической цепи

$$R_{\text{б}} = \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{н}}}{I_{\text{ст}} + I_{\text{н}}}.$$

Порядок выполнения работы

Перечень приборов:

- модуль для исследования характеристик полупроводниковых диодов;
- универсальный источник питания;
- комбинированный измерительный прибор – 2 шт.

1. Исследование характеристики стабилитрона

1.1 Подготовить источник питания к работе:

- ручки регуляторов напряжения и тока 1 и 2 канала повернуть против часовой стрелки до упора;
- кнопки «СИНХРОНИЗАЦИЯ» установить в режим «НЕЗАВИСИМО»;

- включить источник питания (кнопка «POWER»);
- настроить ограничитель тока 1 канала источника питания:
 - соединить клеммы «+» и «-» 1-го канала проводником;
 - повернуть ручку «НАПРЯЖЕНИЕ» по часовой стрелке приблизительно на 90°;
 - переключатель индикатора установить в положение «AMP»;
 - ручкой «ТОК» выставить ограничение тока 0,5 А;
 - снять проводник и вернуть переключатель индикатора в положение «VOLT»;
- ручкой «НАПРЯЖЕНИЕ» установить напряжение питания 0 В.

1.2 Собрать схему, согласно рис.2.4. В качестве вольтметра V1 использовать индикатор источника питания. Переключатель S1 установить в замкнутое положение, а S2 – в разомкнутое.

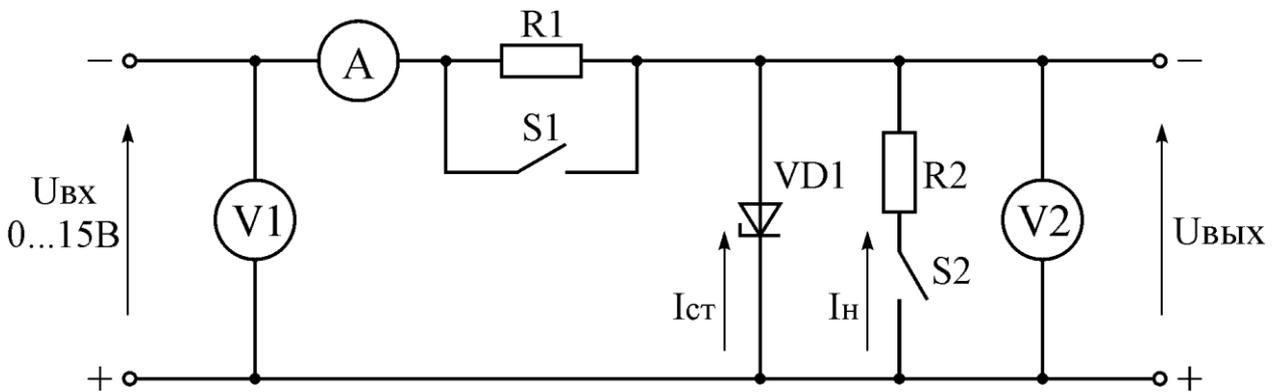


Рисунок 2.4 – Схема для получения характеристик стабилизатора

1.3 Плавно вращая ручку «НАПРЯЖЕНИЕ» источника питания, изменять напряжение от 0 до 6В, фиксируя показания приборов.

1.4 Результаты измерения занести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1

Результаты измерения входных параметров стабилизатора								
$U_{вх}$, В	1	2	3	4	4,5	5	5,3	5,5
I , мА								

1.5 Построить обратную ветвь вольт-амперной характеристики стабилизатора $I = f U_{вх}$.

1.6 На вольт-амперной характеристике стабилизатора построить

линеаризованную характеристику области пробоя стабилитрона. Определить дифференциальное сопротивление стабилитрона в области пробоя. Результаты занести в таблицу 2.2.

Таблица 2.2

Характеристики стабилитрона

$E_{\text{проб}}$	
$r_{\text{д}}$	

1.7 Построить эквивалентную схему замещения стабилитрона в области пробоя (рис.2.5).

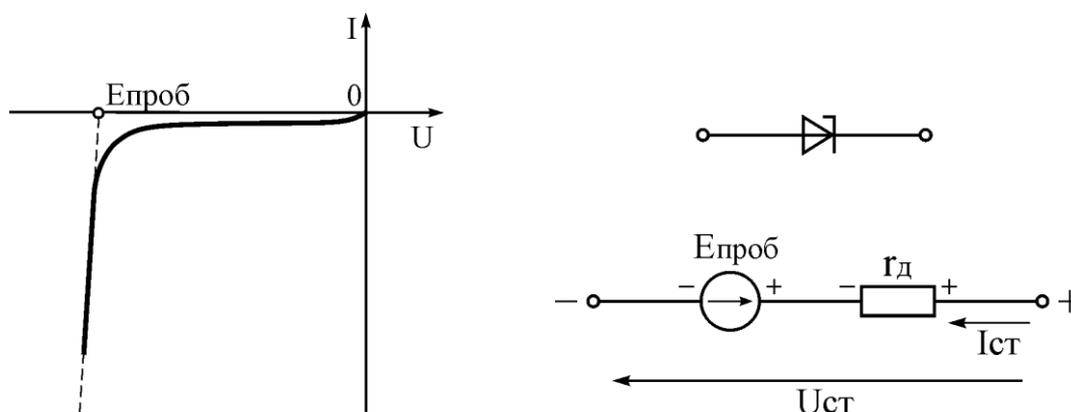


Рисунок 2.5 – Характеристика и схема замещения стабилитрона

2. Исследование параметрического стабилизатора напряжения

- 2.1 Согласно пункта 1.1 подготовить источник питания к работе, установив ограничение тока 0,18 А.
- 2.2 Переключатели S1 и S2 установить в разомкнутое состояние ($R_{\text{H}} = \infty$).
- 2.3 Плавно вращая ручку «НАПРЯЖЕНИЕ» источника питания, изменять напряжение $U_{\text{вх}}$ от 0 до 15 В. Фиксируя показания приборов, заполнить таблицу 2.3.

Таблица 2.3

Результаты измерений характеристик стабилизатора напряжения

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	2	4	5	6	8	10	12	14	
$U_{\text{вых1}}, \text{В}$									$R_{\text{H}} = \infty$
$U_{\text{вых2}}, \text{В}$									$R_{\text{H}} = R_2$

2.4 Сбросить входное напряжение ($U_{\text{вх}} = 0 \text{ В}$), переключатель S2 установить в замкнутое состояние ($R_{\text{Н}} = R_2$) и повторить действия пункта 2.3.

2.5 Построить графические зависимости изменения выходного напряжения от входного $U_{\text{вых}} = f U_{\text{вх}}$ при $R_{\text{Н}} = \infty$ и при $R_{\text{Н}} = R_2$.

3. Анализ экспериментальных данных

3.1 Используя эквивалентную схему замещения стабилитрона, полученную в пункте 1.7, и схему, приведенную на рис.2.4 при S1 – разомкнут, а S2 – замкнут, записать аналитическую зависимость $U_{\text{вых}} = f U_{\text{вх}}$

$$\begin{cases} U_{\text{вх}} = I_{\text{ст}} + I_{\text{н}} R_1 + U_{\text{вых}} \\ U_{\text{вых}} = U_{\text{ст}} = E_{\text{проб}} + r_{\text{д}} I_{\text{ст}} \\ I_{\text{н}} = \frac{U_{\text{вых}}}{R_{\text{Н}}} \end{cases}$$

Разрешив систему уравнений относительно $U_{\text{вых}}$, получим

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} \frac{r_{\text{д}}}{R_1 + r_{\text{д}}} + E_{\text{проб}} \frac{R_1}{R_1 + r_{\text{д}}} - I_{\text{н}} \frac{R_1 r_{\text{д}}}{R_1 + r_{\text{д}}},$$

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} \frac{R_{\text{Н}} r_{\text{д}}}{R_1 R_{\text{Н}} + R_{\text{Н}} r_{\text{д}} + R_1 r_{\text{д}}} + E_{\text{проб}} \frac{R_1 R_{\text{Н}}}{R_1 R_{\text{Н}} + R_{\text{Н}} r_{\text{д}} + R_1 r_{\text{д}}}.$$

3.2 В двух-трех контрольных точках проверить соответствие аналитической зависимости $U_{\text{вых}} = f U_{\text{вх}}$ экспериментальным данным (при $R_{\text{Н}} = R_2$). Результаты занести в таблицу 2.4.

Таблица 2.4

Сравнение аналитических и экспериментальных данных выходного напряжения

	$U_{\text{вх1}} = 12 \text{ В}$	$U_{\text{вх2}} = 14 \text{ В}$
Вычисленные значения $U_{\text{вых}}$		
Значения $U_{\text{вых}}$, полученные в результате эксперимента		

3.3 Определить дифференциальное выходное сопротивление стабилизатора:

- аналитически, согласно выражению

$$r_{\text{вых}} = \frac{\partial U_{\text{вых}}}{\partial I_{\text{н}}} = \frac{R_1 r_{\text{д}}}{R_1 + r_{\text{д}}};$$

- по экспериментальным данным из таблицы 2.3, учитывая что

$$\Delta U_{\text{вых}} = U_{\text{вых1}} - U_{\text{вых2}}, \text{ а } \Delta I_{\text{н}} = I_{\text{н}} = \frac{U_{\text{вых2}}}{R_{\text{н}}}, \text{ так как при } R_{\text{н}} = \infty$$

$$I_{\text{н}} = 0$$

$$r_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta I_{\text{н}}};$$

$r_{\text{вых}}$ определять на участке стабилизации напряжения (пологий участок характеристики);

- сравнить полученные результаты.

3.4 Определить коэффициент неустойчивости по напряжению:

- аналитически, согласно выражению

$$K_{\text{нУ}} = \frac{1}{U_{\text{вых}}} \cdot \frac{\partial U_{\text{вых}}}{\partial U_{\text{вх}}} = \frac{1}{U_{\text{вых}}} \cdot \frac{r_{\text{д}}}{R_1 + r_{\text{д}}} \cdot 100\%;$$

- по экспериментальным данным из таблицы 2.3 для случая, когда $R_{\text{н}} = \infty$ $\Delta U_{\text{вых}} = U'_{\text{вых1}} - U''_{\text{вых1}}$, $\Delta U_{\text{вх}} = U'_{\text{вх}} - U''_{\text{вх}}$

$$K_{HU} = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{U'_{\text{ВЫХ}} \cdot \Delta U_{\text{ВХ}}} \cdot 100\% ;$$

K_{HU} определять на участке стабилизации напряжения.

Коэффициент неустойчивости по напряжению – это отношение относительного изменения выходного напряжения к вызвавшему его изменению входного напряжения.

3.5 Определить коэффициент неустойчивости по току:

- аналитически, согласно выражению

$$K_{HI} = \frac{I_H}{U_{\text{ВЫХ}}} \cdot \frac{\partial U_{\text{ВЫХ}}}{\partial I_H} = \frac{I_H}{U_{\text{ВЫХ}}} \cdot \frac{R_1 r_D}{R_1 + r_D} \approx \frac{r_D}{R_H}, \text{ при } R_1 \gg r_D$$

- по экспериментальным данным из таблицы 2.3, учитывая что

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ1}} - U_{\text{ВЫХ2}}, \Delta I_H = I_H = \frac{U_{\text{ВЫХ2}}}{R_H}, \text{ так как при } R_H = \infty I_H = 0$$

$$K_{HI} = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}} \cdot I_H}{U_{\text{ВЫХ1}} \cdot \Delta I_H};$$

K_{HI} определять на участке стабилизации напряжения.

Коэффициент неустойчивости по току – это отношение относительного изменения выходного напряжения к вызвавшему его относительному изменению тока нагрузки.

3.6 Вычисленные значения занести в таблицу 2.5.

Таблица 2.5

Сравнение вычисленных и экспериментальных данных по выходному сопротивлению и коэффициенту стабилизации

	$r_{\text{ВЫХ}}$	K_{HU}	K_{HI}
Вычисленные значения			
Значения, полученные по экспериментальным данным			