

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

Е.С. Люминарская, А.В. Ситников, П.М. Дмитриев

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫПРЯМИТЕЛЬНОГО ДИОДА,
СТАБИЛИТРОНА, ТИРИСТОРА**

Учебно - методическое пособие

**Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. Баумана
2026**

УДК 621.3

ББК 31.2

Исследование характеристик выпрямительного диода, стабилитрона, тиристора: учебно-методическое пособие (методические указания к выполнению лабораторной работы) по дисциплине «Промышленная электроника». Е.С. Люминарская, А.В. Ситников, П.М. Дмитриев – М.: Изд. – во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026 – , 26 с.: 19 ил.

В теоретической части учебно-методического пособия изложены основные сведения о принципах действия, характеристиках и методах применения выпрямительных диодов, стабилитронов, тиристорov. В практической части пособия дано задание на выполнение лабораторной работы, указаны порядок проведения и вопросы для самоконтроля.

Для студентов 2 курса МГТУ им. Н.Э. Баумана, обучающихся по программе бакалавриата и изучающих дисциплину «Промышленная электроника» на кафедре «Электротехника и промышленная электроника»

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ	4
1.1. Полупроводники и их свойства	4
1.2. <i>p-n</i> -переход. Свойства <i>p-n</i> -перехода	6
1.3. Характеристики <i>p-n</i> -перехода	10
1.4. Выпрямительные диоды	11
1.5. Стабилитроны	12
1.6. Тиристоры	13
2. ЗАДАНИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	16
2.1. Исследование вольт-амперной характеристики (ВАХ) выпрямительного диода ...	16
2.1.1. Монтаж экспериментальной установки для исследований ВАХ диода	17
2.1.2. Проведение эксперимента	18
2.2. Исследование вольт-амперной характеристики стабилитрона	19
2.2.1. Монтаж экспериментальной установки для исследований ВАХ стабилитрона.....	19
2.2.2. Проведение эксперимента	21
2.3. Исследование вольт-амперных характеристик тиристора	22
2.3.1. Монтаж экспериментальной установки для исследований ВАХ стабилитрона.....	22
2.3.2. Проведение эксперимента	24
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	26
ЛИТЕРАТУРА	27

ПРЕДИСЛОВИЕ

В курсе “Промышленная электроника” большое внимание уделяется обучению студентов практическим навыкам исследования электротехнических и электронных систем. Выпускники технических вузов должны иметь не только теоретические знания, но и уметь решать задачи синтеза электронных схем. Для чего им необходимо научиться работать с электронной элементной базой. Комплекс лабораторных работ данного курса предназначен для решения этих задач. Одной из таких базовых работ является лабораторная работа “Исследование характеристик выпрямительного диода, стабилитрона, тиристора”.

Целью выполнения лабораторной работы является закрепление на практике основных положений дисциплины “Промышленная электроника”, приобретение студентами навыков самостоятельного исследования характеристик выпрямительного диода, стабилитрона, тиристора, а также обучение работе с измерительными приборами.

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. Полупроводники и их свойства

Электрические свойства (сопротивление, проводимость) материала определяются наличием в его структуре свободных зарядов, способных перемещаться под воздействием электрического поля. Свободными зарядами называют электроны, которые под действием внешней энергии разрывают свою связь с определенными атомами, расположенными в узлах кристаллической решетки материала.

По своим электрическим свойствам все материалы можно разделить на три группы: проводники, диэлектрики и полупроводники.

Проводник – вещество, в котором электроны (основные носители заряда) слабо связаны с какими-либо определенными атомами. Такие электроны под действием внешнего электрического поля способны разрывать связь с атомом и перемещаться в направлении действия электрического поля, образуя электрический ток.

Диэлектрик – вещество, в котором электроны внешней оболочки жестко связаны с атомами. Под действием внешнего электрического поля электроны не перемещаются, ток в диэлектрике отсутствует.

Полупроводник – вещество, проводимость которого зависит от температуры. При температуре $t^{\circ} = 0 \text{ К}$ такие материалы обладают свойствами диэлектрика. При повышении температуры, электроны теряют связь с атомами, приобретая способность перемещаться под действием внешнего электрического поля. Это явление называют термогенерацией носителей заряда. Количество термогенерируемых электронов невелико,

поэтому даже при повышении температуры, чистые полупроводники можно отнести к разряду диэлектриков.

Для изготовления электронных компонентов чистые полупроводники легируются – в их кристаллическую структуру добавляются атомы пентавалентных или трехвалентных химических элементов (примесей).

Если в структуру четырехвалентного кремния добавить примесь пентавалентного элемента (сурьмы Sb, фосфора P, мышьяка As), то один электрон пентавалентного элемента окажется «лишним» и, следовательно, его связь с атомом будет крайне мала. Под действием даже небольшого внешнего электрического поля избыточный электрон потеряет связь с атомом и станет свободным носителем заряда. Аналогичная картина будет наблюдаться и с трехвалентной примесью (бора B, индия In, алюминия Al), только излишними окажутся не электроны (отрицательные заряды), а положительные заряды – дырки. Полупроводники, в которых примеси создают свободные отрицательные заряды, называются полупроводниками *n*-типа (полупроводники с электронной проводимостью), а примеси называют «донорами». Полупроводники, в которых примеси создают свободные положительные заряды, называются полупроводниками *p*-типа (полупроводники с дырочной проводимостью), а примеси называют «акцепторами».

Примеси существенно увеличивают электрическую проводимость материала полупроводника. Например, для германия внесение 0,001% примеси увеличивает электропроводность в 10^4 раз. Концентрация основных носителей заряда в примесных полупроводниках определяется концентрацией примеси и мало зависит от температуры.

В структуре примесных полупроводников, кроме основных носителей, существуют и неосновные (в полупроводниках *n*-типа – дырки, а в полупроводниках *p*-типа – электроны). Т.к. неосновные носители появляются за счет термогенерации, то их количество не зависит от концентрации примесей, а зависит от температуры полупроводника.

Ток, протекающий в полупроводнике, можно разделить на два вида: дрейфовый и диффузионный. Дрейфовый ток возникает при воздействии на полупроводник электрического поля, в результате чего хаотическое движение свободных носителей заряда приобретает направленный характер.

Диффузионный ток появляется из-за неравномерного распределения носителей заряда в структуре полупроводника. Перемещение (диффузия) происходит из области большей концентрации зарядов в сторону меньшей.

1.2. *p-n*-переход. Свойства *p-n*-перехода

p-n-переходом называется область на границе соприкосновения двух полупроводников разной проводимости (*n*-типа и *p*-типа). Схема образования *p-n*-перехода, а также процессов, протекающих в нем, изображена на рис 1.1. В *n*-области – основные носители заряда – электроны; неосновные носители заряда – дырки, положительно заряженные ионы. В *p*-области основные носители заряда – дырки; неосновные носители заряда – электроны, отрицательно заряженные ионы. В структуре материала ионы неподвижны, а перемещаются основные и неосновные носители заряда.

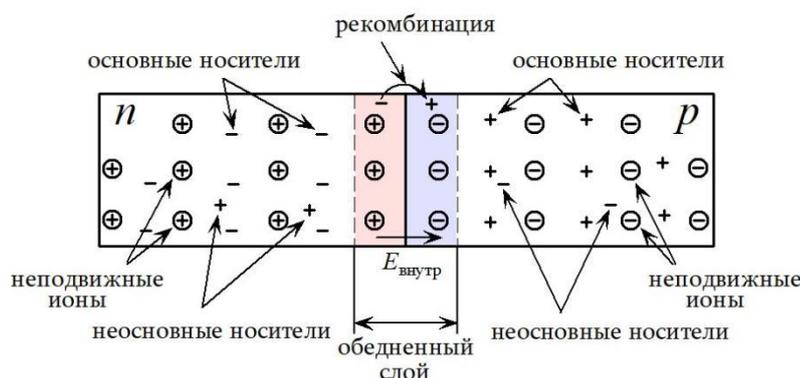


Рис. 1.1. *p-n*-переход

Т.к. концентрация электронов в *p*-области существенно меньше, чем в *n*-области, а концентрация дырок в *n*-области гораздо меньше, чем в *p*, то основные носители заряда начинают перемещаться (возникает диффузионный ток). Это перемещение происходит в двух направлениях: дырки перемещаются в область электронной проводимости, а электроны – в область дырочной. Подвижность электронов выше, чем у дырок, поэтому перемещение основных носителей из *n*-области в *p*-область идет оживленнее, чем из *p*- в *n*-область.

Электроны, попадая в область дырочной проводимости занимают свободные места на валентном уровне атома кристалла (рекомбинируют с дырками), из-за чего в пограничном слое возникает область, обедненная основными носителями заряда, т.е. область с очень низкой электрической проводимостью.

В обедненном слое *n*-области свободные электроны, практически, отсутствуют. Следовательно, эта часть полупроводника приобретает положительный заряд. Аналогично, в *p*-области отсутствуют свободные дырки, поэтому эта часть полупроводника приобретает отрицательный заряд. В граничном слое образуется разность потенциалов ψ_k – внутреннее электрическое поле напряженностью $E_{\text{внутр}}$ (рис. 1.1),

которое препятствует перемещению (диффузии) основных носителей через обедненный слой. Неосновные же носители проходят контактную область беспрепятственно. Разность потенциалов ψ_k называется потенциальным барьером, и высота его определяется по формуле:

$$\psi_k = \varphi_T \ln \left(\frac{N_n P_p}{n_i^2} \right), \quad (1)$$

где ψ_k – потенциальный барьер контактной области;

φ_T – тепловой потенциал;

N_n – концентрация электронов в n области;

P_p – концентрация дырок в p области;

n_i – концентрация носителей в нелегированном полупроводнике.

В свою очередь тепловой потенциал φ_T определяется по формуле:

$$\varphi_T = \frac{kT}{q}, \quad (2)$$

где k – постоянная Больцмана ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К);

T – температура (град К);

q – заряд электрона ($1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл);

Контактная разность потенциалов ψ_k для германия равна 0.6 ... 0.7 В, для кремния 0.9 ... 1.2 В.

Если к p - n -переходу приложить внешнее электрическое поле, то величина контактной разности потенциалов будет меняться. Возможны два варианта включения внешнего источника ЭДС:

- 1) внешнее электрическое поле совпадает по направлению с внутренним (рис. 1.2, а);
- 2) внешнее электрическое поле противоположно внутреннему (рис. 1.2, б)

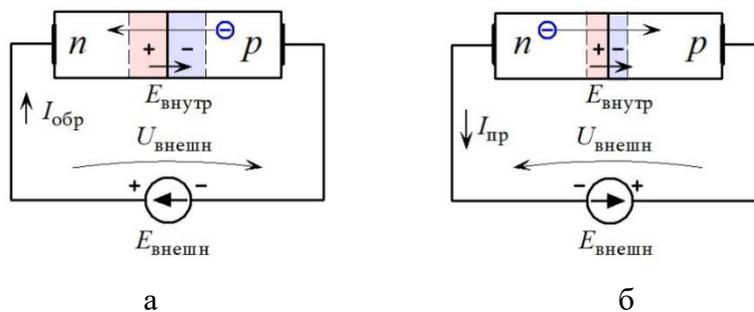


Рис. 1.2. Приложение внешнего напряжения к p - n -переходу:

а – обратное напряжение; б – прямое напряжение

При совпадении по направлению внешнего электрического поля с внутренним (рис. 1.2, а) величина контактного потенциала увеличивается. Основные носители не могут преодолеть обедненный слой, и ток основных носителей (прямой ток) в полупроводнике отсутствует. При этом неосновные носители (электроны p -области и дырки n -области) будут беспрепятственно преодолевать обедненный слой, более того – затягиваться в соседнюю область электрическим полем. Ток неосновных носителей (обратный или тепловой ток) практически не зависит от величины напряжения, подаваемого на полупроводник, но сильно зависит от температуры, т.к. от температуры зависит количество свободных носителей заряда, возникающих при термогенерации. Такой режим работы p - n -перехода называется «обратное включение».

Если внешнее электрическое поле противоположно по направлению внутреннему (рис. 1.2, б), то ширина обедненного слоя снижается. С повышением $E_{\text{внешн}}$, основные носители приобретают способность преодолевать энергетический барьер контактного потенциала, следовательно, возникает прямой ток, величина которого зависит от приложенного к полупроводнику внешнего напряжения. Такой режим работы полупроводника называется «прямое включение».

При прямом включении электроны из n -области, попадая в p -область, становятся в ней неосновными носителями, что приводит к существенному увеличению концентрации последних в p -области. Аналогично, дырки, попадая из p -области в n -область, сильно увеличивают концентрацию неосновных носителей в n -области. Это явление называют *инжекцией* носителей.

Процессы, происходящие в структуре полупроводника, можно представить в виде вольт-амперной характеристики (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Вольт-амперная характеристика p - n -перехода

Если к p - n -переходу приложить очень большое электрическое поле, то даже валентные электроны могут потерять связь с атомами. При этом произойдет резкое увеличение обратного тока, протекающего через обедненный слой. Это явление называется «пробой». Различают электрический и тепловой пробой. Электрический пробой является обратимым состоянием, т.к. он не приводит к повреждению p - n -перехода (разрушению структуры вещества), и при снижении обратного напряжения свойства p - n -перехода восстанавливаются. Тепловой пробой является состоянием необратимым, т.к. может привести к плавлению полупроводникового материала.

Электрический пробой классифицируют по физическим эффектам, происходящим в структуре p - n -перехода, следующим образом (рис. 1.4):

- лавинный пробой. Характерен для p - n -переходов большой толщины при малой концентрации примесей. При высоком обратном напряжении электроны приобретают большую скорость и, сталкиваясь с атомами кристаллической решетки, выбивают из них новые электроны, которые также разгоняются электрическим полем и также выбивают электроны из атома. При увеличении обратного напряжения данный процесс увеличивается. Если приложенное обратное напряжение не уменьшить, то лавинный пробой может перейти в тепловой. Напряжение лавинного пробоя составляет десятки-сотни вольт.

- туннельный пробой. Характерен для тонких p - n -переходов при высокой концентрации примесей. При увеличении напряженности электрического поля в p - n -переходах более 10^5 [В/см] некоторые электроны проходят обедненный слой практически без изменения своей энергии. Данное явление получило название туннельный эффект. Напряжение туннельного пробоя не более единиц вольт.

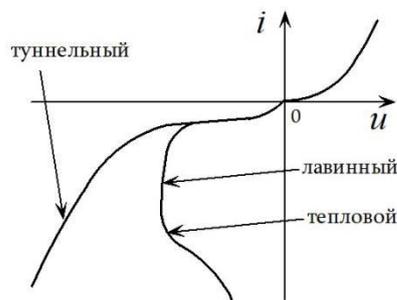


Рис. 1.4. Виды пробоя p - n -перехода

1.3. Характеристики p - n -перехода

Основными характеристиками p - n -перехода являются:

- статическое сопротивление p - n -перехода $R_{ст} = \frac{U}{I}$;

$R_{ст}$ характеризует положение рабочей точки на ВАХ;

- дифференциальное сопротивление $R_{диф} = \frac{dU}{dI}$.

$R_{диф}$ характеризует кривизну ВАХ в определенной (рабочей) точке ВАХ;

- емкость p - n -перехода.

При обратном включении p - n -переход соответствует конденсатору, пластинами которого являются границы обедненного слоя, а сам обедненный слой рассматривается как несовершенный диэлектрик. Емкость обратновключенного p - n -перехода называют барьерной:

$$C_{бар} = \frac{C_{бар}(0)}{\sqrt{1 - \frac{U}{\psi_k}}}, \quad (3)$$

где $C_{бар}(0)$ – барьерная емкость при нулевом напряжении;

U – обратное напряжение;

ψ_k - контактная разность потенциалов.

При прямом включении носители заряда в большом количестве инжектируют через пониженный потенциальный барьер. При этом они не успевают рекомбинировать и в большом количестве накапливаются в p и n областях. Емкость p - n -перехода в данном случае называют диффузионной

$$C_{диф} = \frac{I}{\varphi_T} \tau_p, \quad (4)$$

где I – прямой ток;

φ_T – тепловой потенциал;

τ_p – время жизни неосновных носителей.

Полная емкость p - n -перехода складывается из барьерной и диффузионной

$$C = C_{\text{диф}} + C_{\text{бар}} \quad (5)$$

1.4. Выпрямительные диоды

Выпрямительный диод – полупроводниковый элемент с одним p - n -переходом и двумя выводами (анод, катод), предназначенный для преобразования переменного тока в постоянный.

По сути выпрямительный диод является p - n -переходом, ВАХ которого изображена на рис. 1.5., и полностью соответствует ВАХ p - n -перехода,

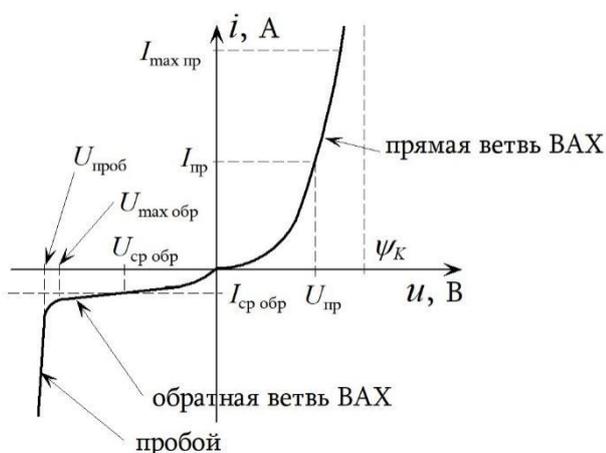


Рис. 1.5. ВАХ выпрямительного диода

В качестве материала для изготовления диодов используют преимущественно кремний (Si) и арсенид галлия (GaAs). Германий (Ge) применяют редко из-за большой зависимости обратного тока от температуры. Применение диодов на разных частотах зависит от их конструкции и материала. Структура и условно-графическое обозначение (УГО) диода приведены на рис. 1.6.

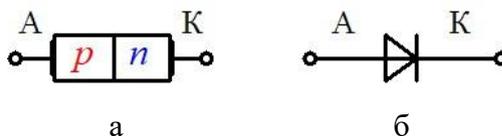


Рис. 1.6. Выпрямительный диод:

а – структура; б – УГО на схеме

На рис. 1.3 обозначено: А – анод (положительный электрод диода), К – катод (отрицательный электрод диода).

Выпрямительные диоды характеризуются следующими параметрами (рис. 1.5):

- максимальный прямой ток ($I_{\text{пр max}}$);
- падение напряжения на диоде при заданном значении прямого тока ($I_{\text{пр}}$);
- максимально допустимое постоянное обратное напряжение диода ($U_{\text{max обр}}$);
- обратный ток ($I_{\text{ср обр}}$) при заданном обратном напряжении ($U_{\text{ср обр}}$);
- барьерная емкость ($C_{\text{бар}}$);
- диапазон частот, в котором возможна работа диода без существенного снижения прямого тока;
- рабочий диапазон температур.

Динамические характеристики выпрямительных диодов (быстродействие) зависят, в основном, от скорости рассасывания зарядов на границах p - n -перехода, т.е. от величины барьерной $C_{\text{бар}}$ и диффузионной $C_{\text{диф}}$ емкостей, которые в свою очередь зависят от конструкции диода.

Проанализировав ВАХ, то можно сделать вывод, что при работе диода в прямом направлении, он ведет себя как резистивный элемент (нелинейный резистор), а в обратном через него протекает очень небольшой (порядка десяти микроампер) ток. То есть диод пропускает ток только в одном направлении. Следовательно, если на диод подать синусоидальное напряжение, то ток, проходящий через диод, будет иметь пульсирующий характер, т.е. среднее значение тока будет отлично от нуля. Это свойство диода используется, например, для получения из синусоидального сетевого напряжения постоянного напряжения. Поэтому такие диоды называют «выпрямительными».

Выпрямительные диоды характеризуются малыми потерями в p - n -переходе, а также способностью пропускать большие токи. Мощные выпрямительные диоды имеют массивный корпус для отвода тепла от перехода.

Работают выпрямительные диоды обычно на частоте переменного тока 50-60 Гц.

1.5. Стабилитроны

Стабилитроны – это полупроводниковые диоды, работающие в режиме лавинного пробоя. Т.к. лавинный пробой является обратимым, то время работы диода в этом режиме, при соблюдении теплового режима, не ограничено.

На рис. 1.7 изображены условно-графическое обозначение стабилитрона и его вольт-амперная характеристика.

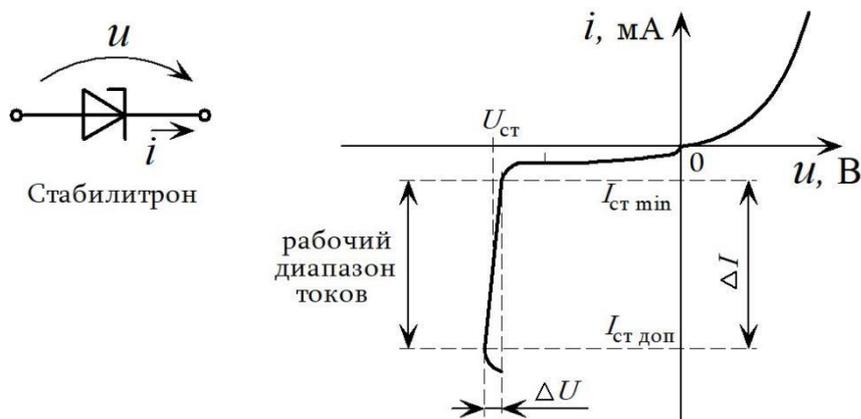


Рис. 1.7. УГО и ВАХ стабилитронов

В рабочем диапазоне токов (ΔI рис. 1.7) напряжение на стабилитроне меняется незначительно (ΔU рис. 1.7), следовательно такие элементы можно использовать в устройствах стабилизации постоянного напряжения. При этом необходимо учитывать, что в рабочем режиме (лавинный пробой) сопротивление стабилитрона очень мало, поэтому для ограничения тока, протекающего через стабилитрон, последовательно с ним подключают резистор.

Основными параметрами стабилитрона (рис. 1.7) являются:

- напряжение стабилизации ($U_{ст}$);
- допустимый ток через стабилитрон ($I_{ст доп}$);
- минимальный ток стабилизации ($I_{ст min}$);
- дифференциальное сопротивление стабилитрона $R_{диф} = \frac{\Delta U}{\Delta I}$ (наклон ВАХ в области пробоя).
- температурный коэффициент напряжения ($ТКН_U$).

1.6. Тиристоры

Тиристор — это четырехслойный полупроводниковый прибор с тремя $p-n$ переходами, обладающий двумя устойчивыми состояниями: закрыт, открыт. Перевод тиристора из закрытого в открытое состояние осуществляется внешним воздействием на прибор. Наиболее широко для отпирания тиристорov используется воздействие напряжением или током.

Основными типами тиристоров являются диодные (рис.1.8, а) и триодные тиристоры (рис.1.8,б).

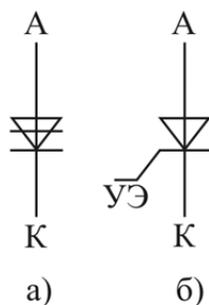


Рис.1.8. УГО тиристоров, а — диодный; б — триодный

В диодных тиристорах (динисторах) переход прибора из закрытого состояния в открытое происходит, когда напряжение между анодом и катодом достигает некоторого граничного значения, которое является одним из параметров прибора. В триодных тиристорах переход прибора из закрытого состояния в открытое происходит по цепи управляющего электрода.

На рис. 1.9. изображены конструкция триодного тиристора с управляющим электродом в p -слое (рис. 1.9, а) его условно-графическое обозначение (рис. 1.9, б) и обозначение триодного тиристора с управляющим электродом на n -слое (рис. 1.9, в)

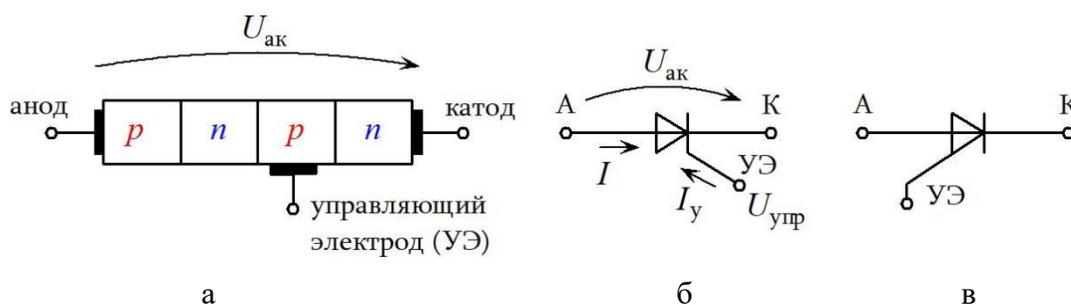


Рис. 1.9. Тиристор: а – конструкция; б – УГО тиристора с управляющим электродом на p -слое; в – УГО тиристора с управляющим электродом на n -слое

Принцип действия тиристора можно рассмотреть на его ВАХ (рис.1.10.) При подаче на тиристор относительно малых напряжений ($U_{ак} < U_{пор}$) его срединный $p-n$ переход закрыт. Следовательно, ток проходящий через тиристор, практически равен нулю. Пороговым напряжением ($U_{пор}$) называют напряжение включения тиристора ($U_{вкл}$ на рис. 1.10). При превышении порогового напряжения $U_{ак} > U_{пор}$ закрытый $p-n$ переход

открывается. Этот процесс протекает лавинообразно. Сопротивление тиристора резко падает, резко падает напряжение $U_{ак}$, ток, проходящий через тиристор при этом растет незначительно. При достижении прямым током значения тока удержания $I_{уд}$, дальнейший рост тока при увеличении $U_{ак}$ происходит по графику прямой ветви выпрямительного диода. Таким образом, ВАХ тиристора при нулевом напряжении на управляющем электроде будет выглядеть, как показано на рис. 1.9 (кривая $I_{упр} = 0$).

Если на управляющий электрод подать напряжение, то за счет введения дополнительных носителей заряда в один из средних слоев полупроводника «включение» тиристора произойдет при более низком напряжении $U_{ак}$ (рис. 1.10, кривая $I_{упр} > 0$):

$$U_{вкл\ 2} < U_{вкл\ 1}.$$

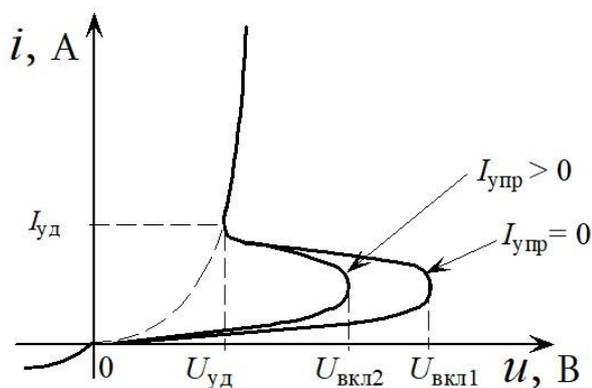


Рис. 1.10. ВАХ тиристора

После включения (открытия) тиристора управляющий электрод теряет свою способность регулирования. Выключить (закрыть) тиристор, меняя ток управляющего электрода невозможно. Для закрытия тиристора чаще всего изменяют полярность подаваемого на тиристор напряжения, либо включают последовательно тиристоры резистор, тем самым ограничивая ток анода.

Основными параметрами тиристоров являются:

- постоянное напряжение включения $U_{вкл}$;
- напряжение на тиристоре в открытом состоянии $U_{откр\ max}$;
- постоянное прямое напряжение в закрытом состоянии $U_{закр\ max}$ (максимальное значение прямого напряжения, при котором не происходит включение тиристора) при нулевом токе управляющего электрода;
- максимальное значение тока открытого тиристора $I_{откр\ max}$;
- неотпирающее напряжение на управляющем электроде $U_{упр\ max}$ (наибольшее напряжение, не вызывающее отпирание тиристора);

- отпирающий ток $I_{y \min}$ (наименьший ток управляющего электрода, необходимый для включения тиристора);
- ток удержания $I_{уд}$ (минимальный прямой ток, протекающий через тиристор с разомкнутой цепью управления, при котором тиристор находится в открытом состоянии).

Чаще всего тиристоры используются в системах управления мощной нагрузкой с помощью слабых сигналов, т.е. в качестве электронных ключей. Также они используются в управляемых выпрямителях и регуляторах мощности (триммерах).

2. ЗАДАНИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

2.1. Исследование вольт-амперной характеристики (ВАХ) выпрямительного диода

Схема для исследования ВАХ выпрямительного диода изображена на рис. 2.1.

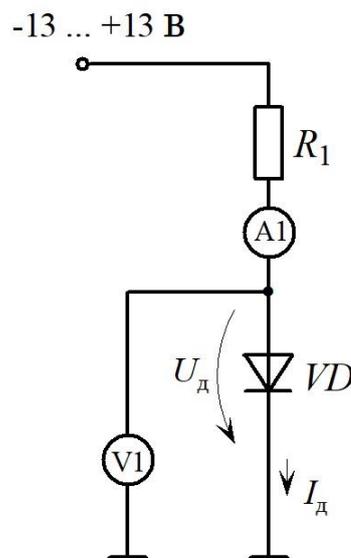


Рис. 2.1. Схема для исследования ВАХ выпрямительного диода

Номиналы элементов: диод VD – номинал диода указан на миниблоке; резистор $R1 = 220 \text{ Ом}$.

Для схемы рис. 2.1 необходимо снять и построить ВАХ диода: $I_d = f(U_d)$.

Измерения нужно проводить с помощью мультиметров, включенных в режиме измерения напряжения (рис. 2.2, а) и в режиме измерения тока (рис. 2.2, б) с учетом полярности включения.

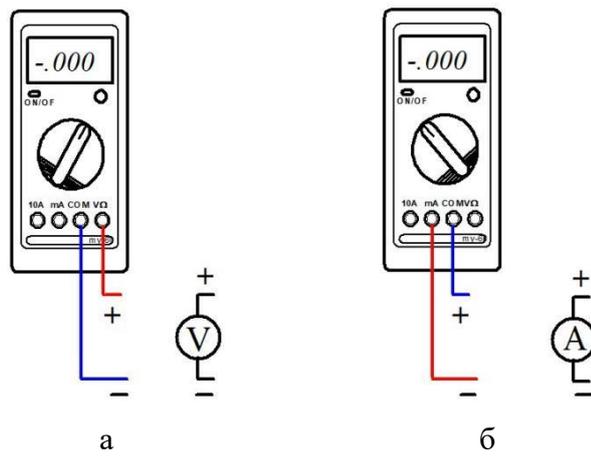


Рис. 2.2. Мультиметры: а – в режиме вольтметра; б - в режиме амперметра

2.1.1. Монтаж экспериментальной установки для исследования ВАХ выпрямительного диода

Поместите миниблоки на наборное поле так, как показано на рис.2.3.

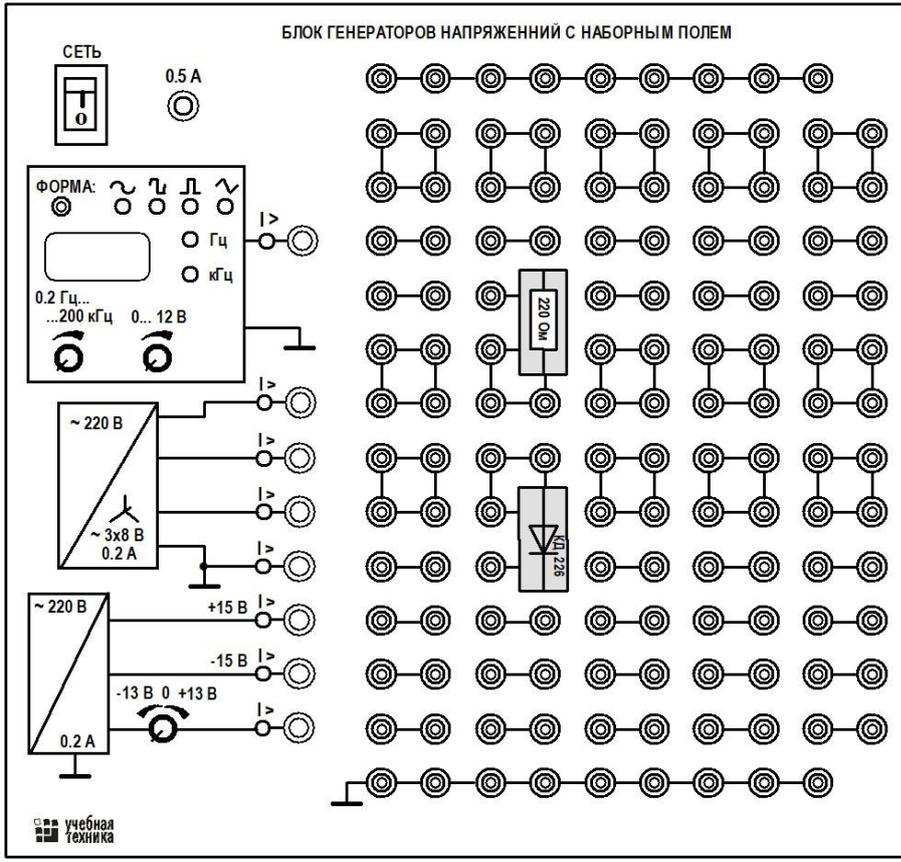


Рис. 2.3. Монтажная схема установки миниблоков

Соберите схему с диодом, включите в схему измерительные приборы так, как показано на рис. 2.4.

ВНИМАНИЕ! Перед подключением измерительных приборов убедитесь, что переключатель режимов мультиметров установлен в положение «A» для измерения постоянного тока или в положение «V» для измерения постоянного напряжения.

ВНИМАНИЕ! Монтаж схемы проводите при выключенном тумблере «СЕТЬ» на блоке генераторов.

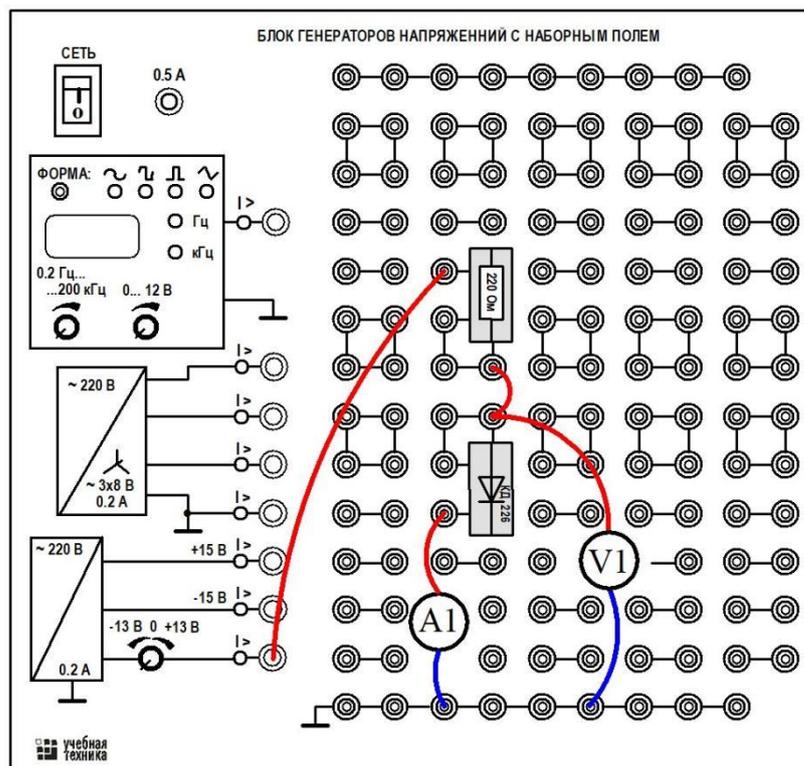


Рис. 2.4. Монтажная схема экспериментальной установки

Анод диода подключается через резистор R_1 к источнику постоянного напряжения $E_{вх} = \pm 13$ В. Источник $E_{вх} = \pm 13$ В регулируется в диапазоне от -13 В до +13 В. Резистор R_1 ограничивает ток через диод. Сопротивление открытого диода мало, и большой ток, проходящий через диод, может вывести элемент из строя.

2.1.2. Проведение эксперимента

Для снятия вольт-амперной характеристики диода, подайте на анод постоянное напряжение, (контролируйте напряжение на диоде мультиметром в режиме вольтметра). Изменяя это напряжение от -5 В до +0.7 В фиксируйте значения тока, протекающего через диод, контролируйте мультиметром в режиме амперметра. При снятии обратной ветви

ВАХ выберите шаг измерения порядка 1 В. При снятии прямой ветви ВАХ выберите шаг измерения порядка 0.1 В. Результаты измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1.

U_d , В	-5					+0.7
I_d , мА						

По результатам измерений постройте ВАХ диода.

Сделайте выводы.

2.2. Исследование вольт-амперной характеристики стабилитрона

Схема для исследования ВАХ стабилитрона, изображена на рис. 2.5.

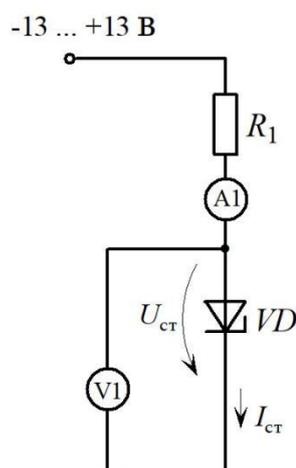


Рис. 2.5. Схема для исследования ВАХ стабилитрона

Номиналы элементов: стабилитрон VD – КС456; резистор $R1 = 220$ Ом.

Для схемы рис. 2.2 необходимо снять и построить ВАХ стабилитрона: $I_{ст} = f(U_{ст})$.

2.2.1. Монтаж экспериментальной установки для исследования ВАХ стабилитрона

Поместите миниблоки на наборное поле так, как показано на рис.2.6.

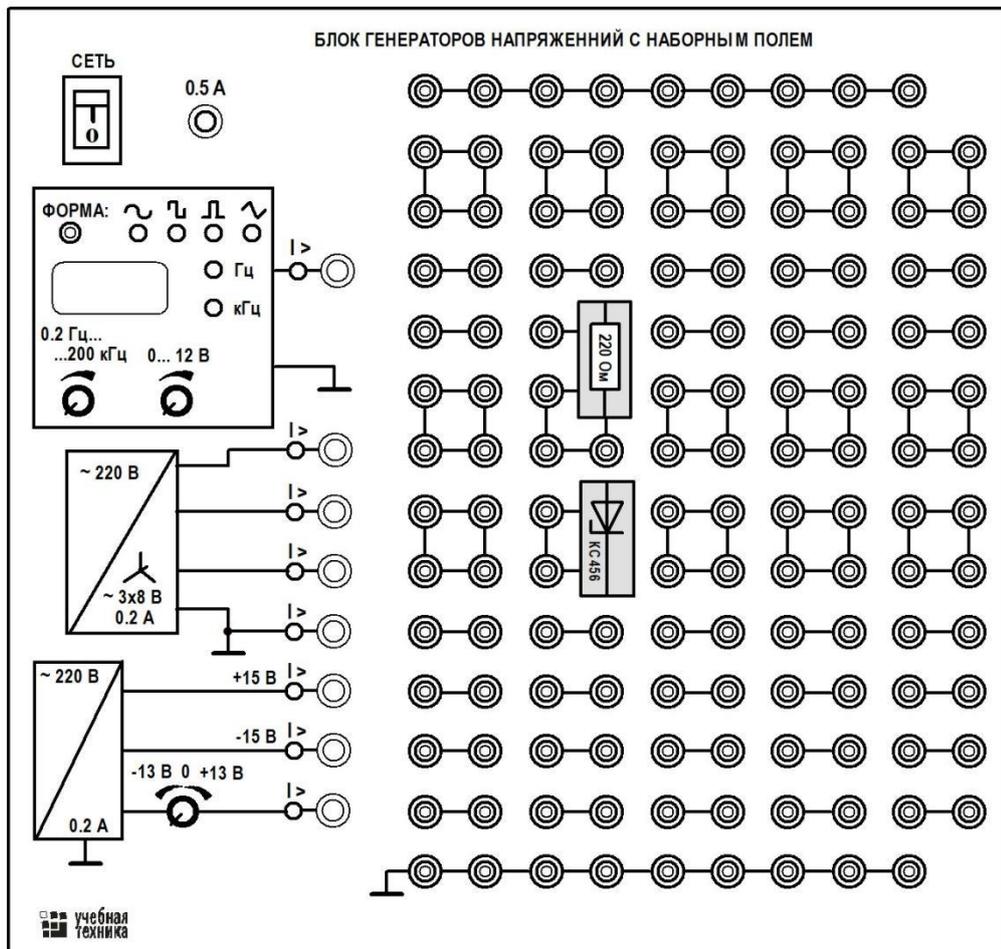


Рис. 2.6. Монтажная схема установки миниблоков

Соберите схему со стабилизатором, включите в схему измерительные приборы так, как показано на рис. 2.7.

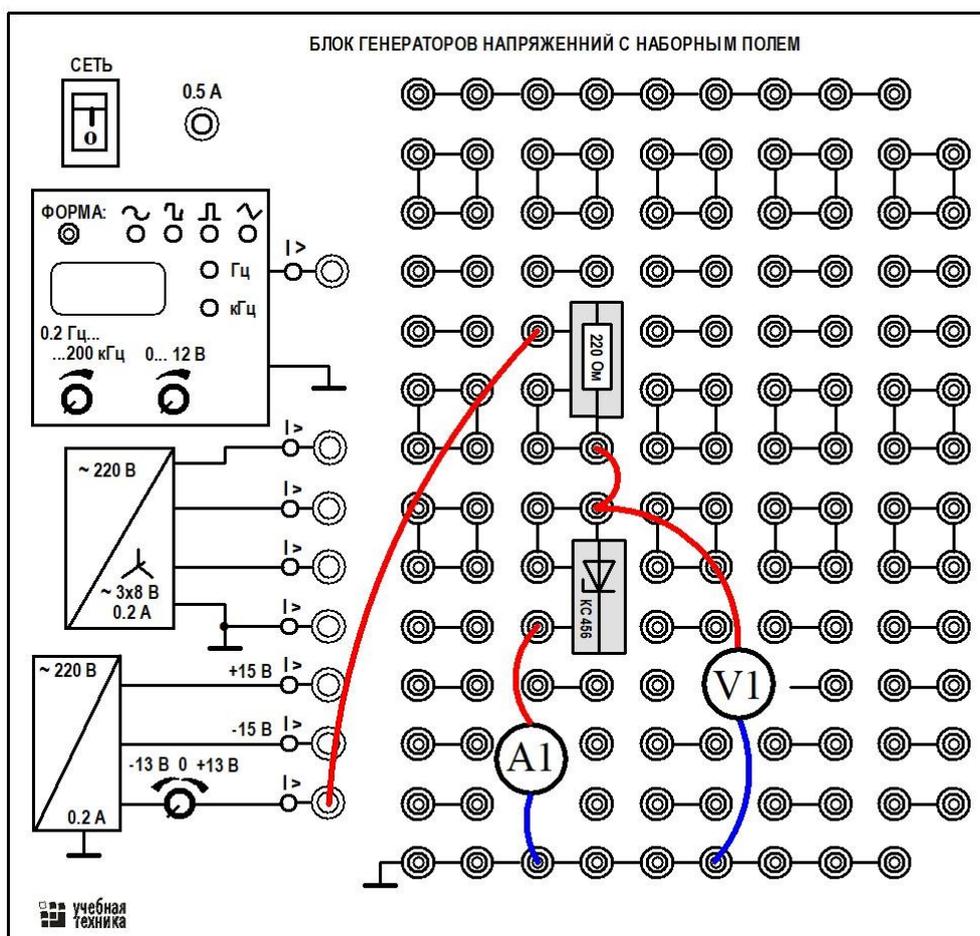


Рис. 2.7. Монтажная схема экспериментальной установки

Анод стабилитрона подключается через резистор R_1 к источнику постоянного напряжения $E_{\text{вх}} = \pm 13$ В. Источник $E_{\text{вх}} = \pm 13$ В регулируется в диапазоне от -13 В до $+13$ В. Резистор R_1 ограничивает ток через стабилитрон. Сопротивление стабилитрона, работающего в режиме лавинного пробоя (рабочий режим стабилитрона), мало, и большой ток, проходящий через стабилитрон, может вывести элемент из строя.

2.2.2. Проведение эксперимента

Для снятия вольт-амперной характеристики стабилитрона, подайте на анод постоянное напряжение, контролируйте напряжение на диоде мультиметром в режиме вольтметра. Изменяя это напряжение от -6 В до $+0.7$ В фиксируйте значения тока, протекающего через диод, контролируйте мультиметром в режиме амперметра. При снятии обратной ветви ВАХ выбирайте шаг измерения порядка 1 В. При снятии прямой ветви ВАХ выбирайте шаг измерения порядка 0.1 В. Результаты измерений занести в таблицу 2.

Таблица 2.

$U_{ст}, В$	-6					+0.7
$I_{ст}, мА$						

По результатам измерений постройте ВАХ стабилитрона.

По ВАХ рассчитайте дифференциальное сопротивление стабилитрона в режиме лавинного пробоя по формуле $R_{диф} = \frac{\Delta U}{\Delta I}$ (рис. 1.7).

Сделайте выводы.

2.3. Исследование вольт-амперных характеристик тиристора

Схема для исследования ВАХ тиристора, изображена на рис. 2.8.

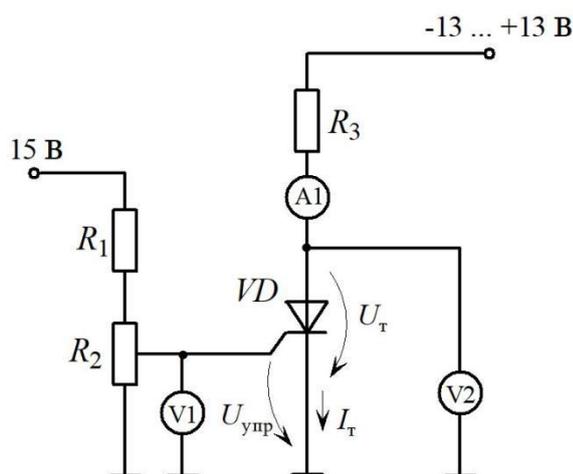


Рис. 2.8. Схема для исследования ВАХ тиристора

Номиналы элементов: тиристор VD – BT149G; резистор $R1 = 2.2 \text{ кОм}$; переменный резистор $R2 = 1 \text{ кОм}$; резистор $R3 = 220 \text{ Ом}$.

Для схемы рис. 2.8 необходимо снять и построить ВАХ тиристора: $I_T = f(U_T)$ для двух значений $U_{упр}$ ($U_{упр} = 0$ и $U_{упр} > 0$).

2.3.1. Монтаж экспериментальной установки для исследования ВАХ тиристора

Поместите миниблоки на наборное поле так, как показано на рис.2.9.

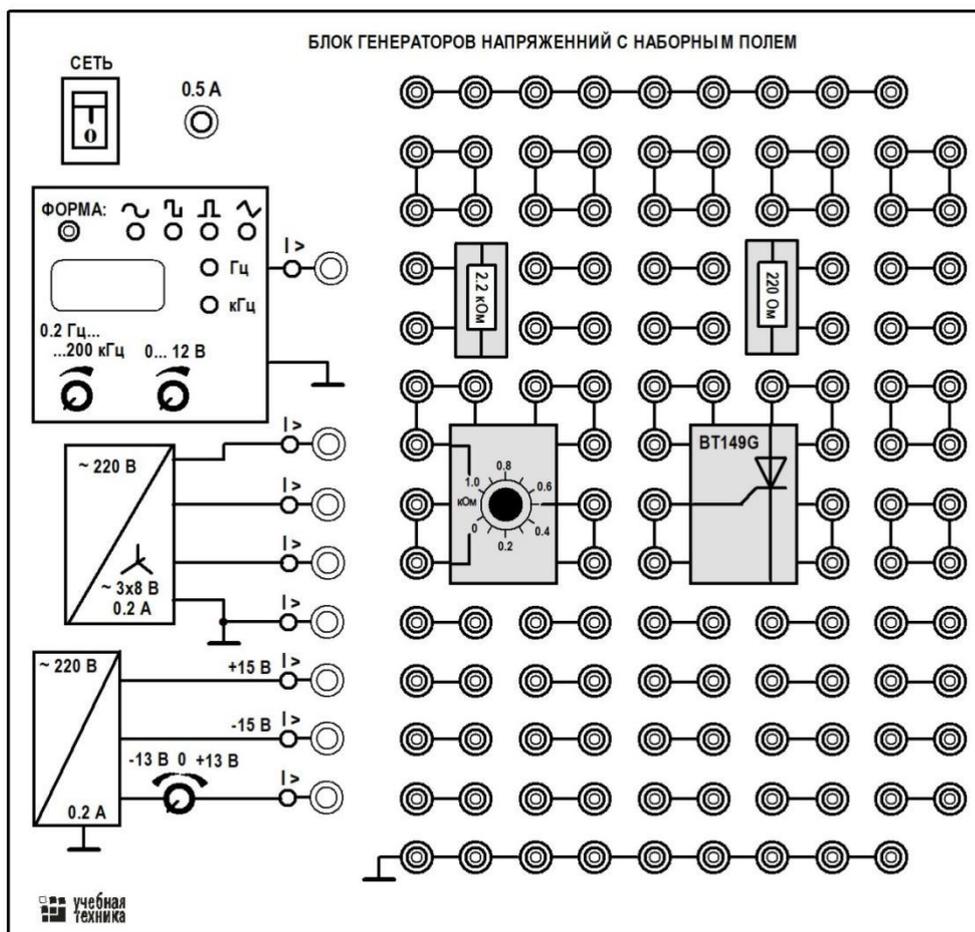


Рис. 2.9. Монтажная схема установки миниблоков

Соберите схему с тиристором, включите в схему измерительные приборы так, как показано на рис. 2.10.

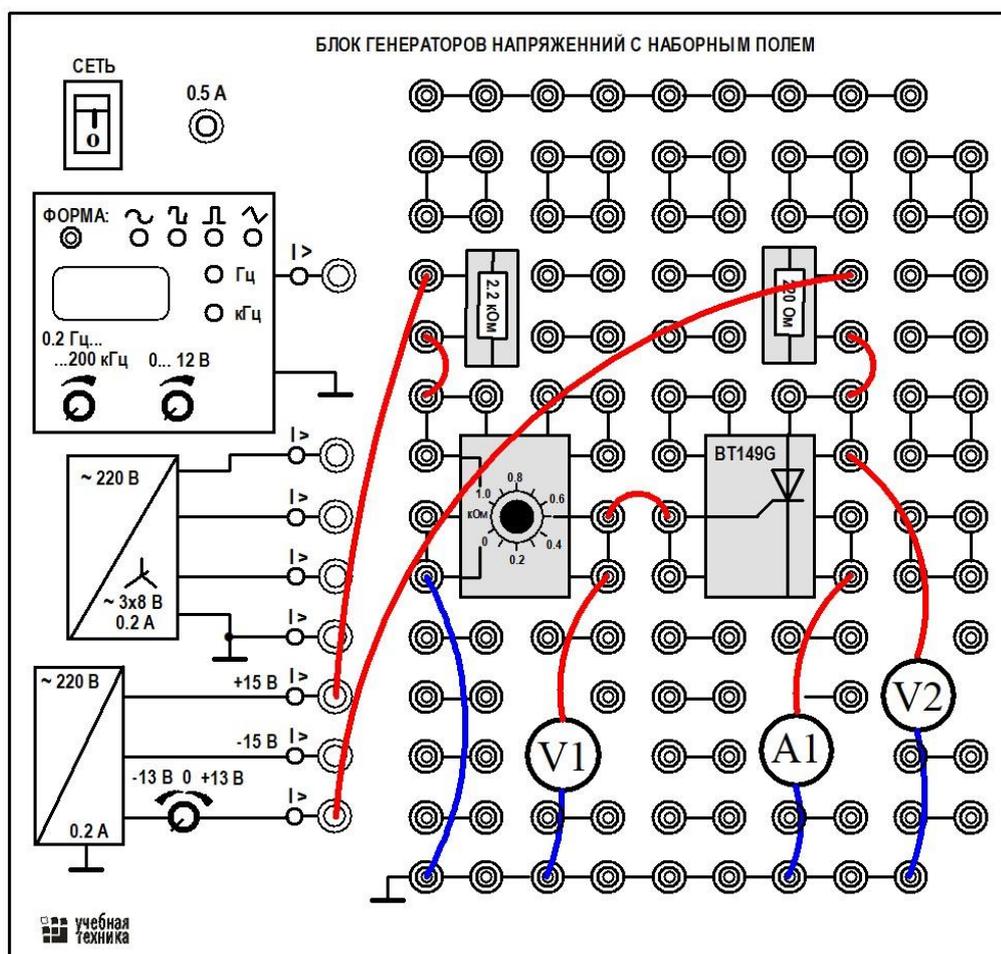


Рис. 2.10. Монтажная схема экспериментальной установки

Анод тиристора подключается через резистор R_3 к источнику постоянного напряжения $E_{вх} = \pm 13$ В. Источник $E_{вх} = \pm 13$ В регулируется в диапазоне от -13 В до +13 В. Резистор R_3 ограничивает ток, проходящий через тиристор, т.к. сопротивление тиристора в открытом состоянии мало.

2.3.2. Проведение эксперимента

Для снятия вольт-амперной характеристики тиристора при нулевом сигнале управления, подайте напряжение $U_{ист} = 15$ В от источника постоянного напряжения на делитель R_1, R_2 и, изменяя положение движка переменного резистора, добейтесь значения напряжения на управляющем электроде $U_{упр} = 0$. Напряжение на управляющем электроде тиристора контролируйте по мультиметру V1 в режиме вольтметра.

Изменяя напряжение, подаваемое на анод тиристора от регулируемого источника напряжения $E_{вх} = \pm 13$ В в диапазоне от -5 до +13 В, измерьте ток, протекающий через тиристор, мультиметром A1 в режиме амперметра. Напряжение на тиристоре

контролируйте по мультиметру V2 в режиме вольтметра. Результаты измерений занесите в таблицу 3.

Таблица 3.

	$U_{упр} = 0$					
$U_T, В$	-5					+13
$I_T, мА$						

По результатам измерений постройте ВАХ тиристора при нулевом сигнале управления.

По ВАХ определите пороговое напряжение ($U_{вкл}$), при котором тиристор открывается.

Измените положение движка переменного резистора R_2 , и добейтесь значения напряжения на управляющем электроде ($U_{упр} \cong 5 В$). Напряжение на управляющем электроде тиристора контролируйте по мультиметру V1 в режиме вольтметра.

Изменяя напряжение, подаваемое на анод тиристора от регулируемого источника напряжения $E_{вх} = \pm 13 В$ в диапазоне от -5 до +13 В, измерьте ток, протекающий через тиристор, мультиметром A1 в режиме амперметра. Напряжение на тиристоре контролируйте по мультиметру V2 в режиме вольтметра. Результаты измерений занесите в таблицу 4.

Таблица 4.

	$U_{упр} =$					
$U_T, В$	-5					+13
$I_T, мА$						

По результатам измерений постройте ВАХ тиристора при значении напряжения на управляющем электроде $U_{упр} \cong 5 В$.

По ВАХ определите пороговое напряжение ($U_{вкл}$), при котором тиристор открывается.

Сделайте выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как влияет температура на свойства полупроводника?
2. Для чего легируются полупроводники? Как образуются полупроводники *p*-, *n*- типа?
3. Какой ток в полупроводнике называется дрейфовым, диффузионным?
4. Что называется *p-n* переходом? ВАХ.
5. Что называется пробоем в полупроводнике? Виды пробоя? Какой вид пробоя является обратимым?
6. Основные характеристики *p-n* перехода.
7. Какие диоды называют выпрямительными? Почему данные диоды называют «выпрямительными»?
8. ВАХ и основные параметры выпрямительного диода.
9. Какие диоды называют стабилитронами? ВАХ и основные параметры стабилитронов.
10. Какой полупроводниковый элемент называют тиристором?
11. ВАХ тиристора. Назначение управляющего электрода?
12. Способы выключения тиристоров.
13. Основные параметры тиристоров.
14. Какие тиристоры называются динисторами?

ЛИТЕРАТУРА

1. Ситников А.В., Ситников И.А. Прикладная электроника: Учебник / А.В. Ситников, И.А. Ситников – М.: КУРС: ИНФРА-М, 2017. 272 с.
2. Прянишников В.А. Электроника: Курс лекций / В.А. Прянишников. – СПб.: Корона-принт, 1998. – 400с.
3. Лагин В.И., Савелов Н.С. Электроника / В.И. Лагин, Н.С. Савелов. – Ростов-на-Дону.: Феникс, 2002 – 572 с.
4. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1982. –496 с.