

Министерство образования Российской Федерации  
КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ им. А. Н. ТУПОЛЕВА

Кафедра радиоэлектроники и информационно-измерительной техники

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ  
ДВУХПОЛЮСНИКОВ

Методические указания  
к лабораторной работе № 205

Казань 2009

УДК 621.317

Исследование полупроводниковых двухполюсников: составители:  
И. К. Насыров, Л. М. Урманчеев, М. И. Нургалиев, Н. Б. Куншина, 2009. 14 с.  
Методические указания к лабораторной работе № 205 /Казан. гос. техн. унт;

Цель работы: ознакомление с основными полупроводниковыми двухполюсниками, их принципом действия; статистическими характеристиками, параметрами.

### Полупроводниковые диоды.

Полупроводниковым диодом называют электропреобразовательный полупроводниковый прибор с одним или несколькими  $p-n$  переходами и двумя выводами. В зависимости от основного назначения и вида используемого явления в  $p-n$  переходе различают шесть основных функциональных типов электропреобразовательных полупроводниковых диодов: выпрямительные, высокочастотные, импульсные, туннельные, стабилитроны, варикапы. Каждый тип диода содержит ряд типонаименований, регламентированных соответствующим ГОСТом. Одна из областей  $p-n$  структуры, называемая эмиттером, имеет большую концентрацию основных носителей заряда, чем другая область, называемая базой. На рис. 1 представлены структуры планарно-эпитаксиального (а) и сплавного (б) диодов. База и эмиттер образуют омические переходы (контакт) с электродами. К электродам подсоединены металлические выводы (В), посредством которых диод включается в цепь.

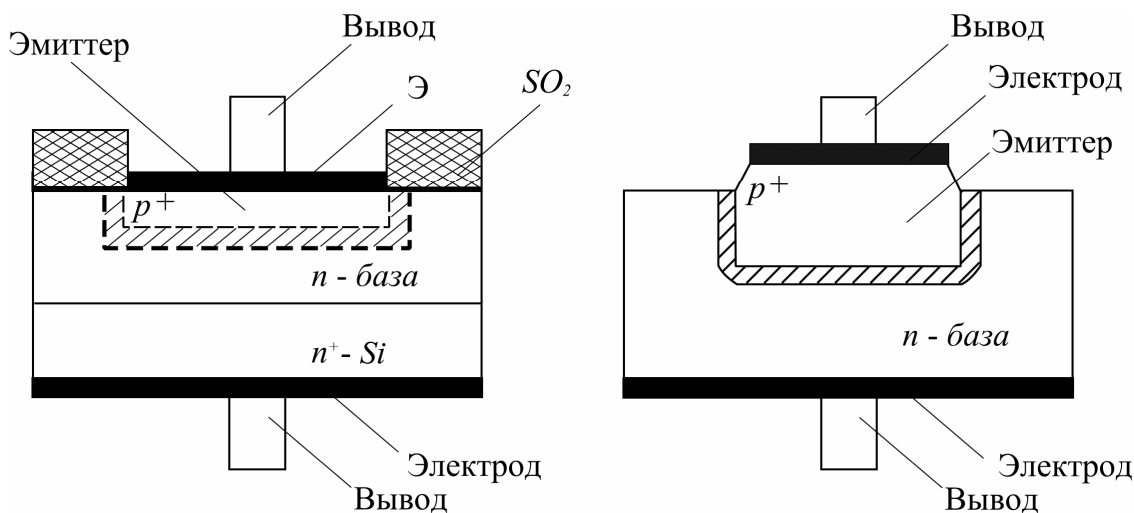


Рис. 1

Основной характеристикой полупроводниковых диодов служит вольт-амперная характеристика. В отличие от характеристики идеального  $p-n$  перехода, описываемой соотношением  $I = I_0[\exp(eU/kT) - 1]$  (пунктирная кривая на рис. 2), характеристика реального диода (сплошная кривая на рис. 2) в области прямых напряжений  $U$  располагается несколько ниже из-за падения части приложенного напряжения на объёмном сопротивлении базы диода  $r$ .

Уравнение вольт-амперной характеристики примет вид:

$$I = I_0 \left[ \exp \left( \frac{U}{\Phi_T} \right) - 1 \right],$$

где  $U$  - напряжение на  $p-n$  переходе;  $I_0$  - обратный (или тепловой) ток.

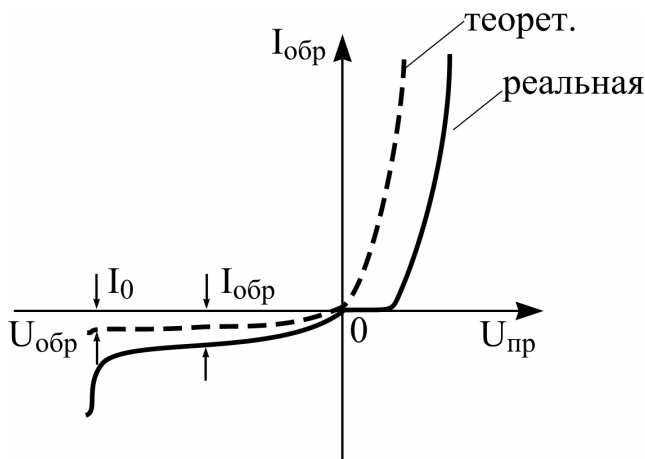


Рис. 2

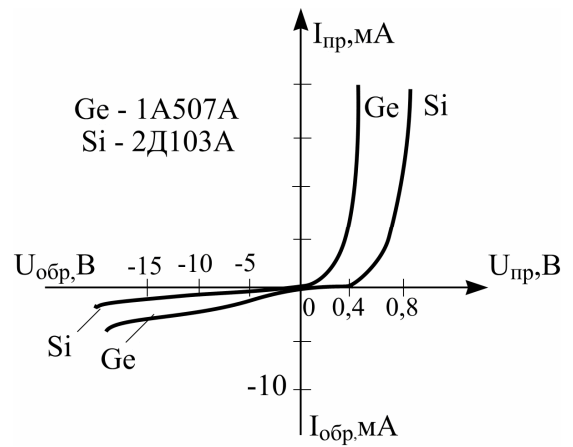


Рис. 3

В области обратных напряжений можно пренебречь падением напряжения в объёме полупроводника. При достижении обратным напряжением определённого критического значения ток диода начинает резко возрастать. Это явление называют пробоем диода.

Различают два основных вида пробоя электронно-дырочного перехода: электрический и тепловой. В обоих случаях резкий рост тока связан с увеличением числа носителей заряда в переходе. Электрический пробой обратим, т.е. после уменьшения величины обратного напряжения  $p-n$ -переход восстанавливает свои первоначальные свойства. Тепловой пробой, необратим. Он сопровождается разрушением кристаллической решетки  $p-n$ -перехода, после чего  $p-n$ -переход не восстанавливает свои первоначальные свойства. Причиной теплового пробоя является нарушение устойчивости теплового режима  $p-n$ -перехода. Это означает, что количество теплоты, выделяющейся в переходе от нагрева его обратным током превышает количество теплоты, отводимой от перехода. В результате температура перехода возрастает, сопротивление его уменьшается и ток увеличивается, что приводит к перегреву перехода и его тепловому разрушению.

Электрический пробой бывает двух видов - лавинный и туннельный.

Лавинный пробой объясняется лавинным размножением за счет ударной ионизацией, т.е. при более высоком обратном напряжении электроны приобретают большую скорость и, ударяя в атомы кристаллической решетки, выбивают из них все новые, которые в свою очередь разгоняются полем и также выбивают из атомов электроны. Этот пробой характерен для  $p-n$ - переходов большей толщины, получающихся при небольшой концентрации примесей. А для переходов малой толщины, которые получают при высокой концентрации примесей, возможен туннельный пробой. Под действием сильного электрического поля происходит отрыв валентных электронов, в результате чего в объёме  $p-n$ -перехода образуются новые свободные носители заряда.

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.3. Сравнивая эти характеристики видим, что кремниевые диоды имеют

меньшую величину обратного тока из-за более низкой концентрации неосновных носителей. По этой же причине прямая ветвь характеристики у кремниевых диодов идет значительно ниже, чем у германиевых. Концентрация неосновных носителей зависит от ширины запрещенной зоны, одного из важных параметров полупроводников. Он определяет энергию необходимую для образования электронно-дырочных пар. При повышении температуры абсолютная величина изменения обратного тока в кремниевом диоде значительно меньше, чем в германиевом (рис.4).

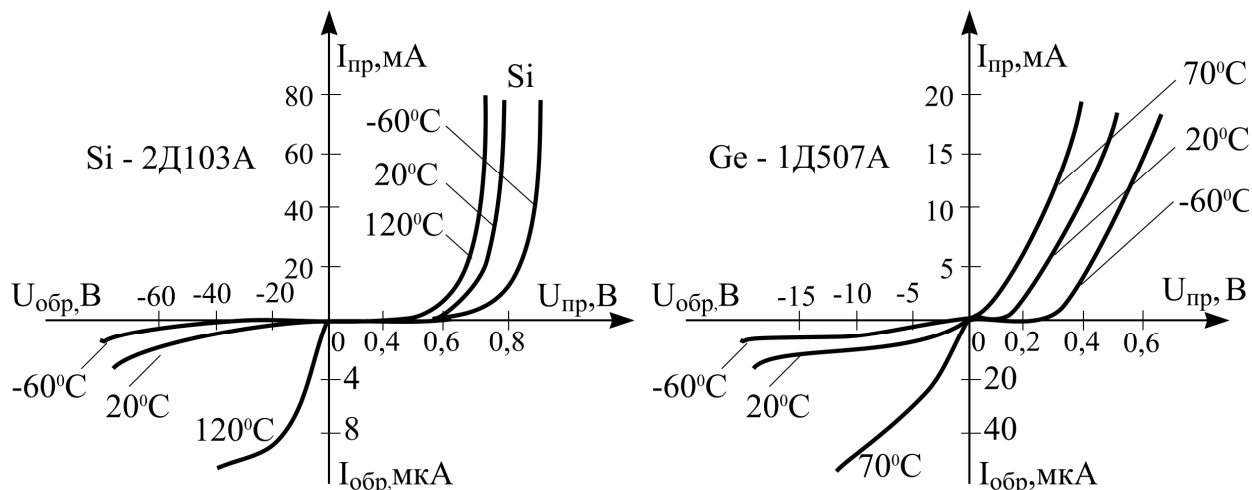


Рис.4

### Полупроводниковые стабилитроны.

Назначение стабилитрона - стабилизировать напряжение на присоединённой параллельно ему нагрузке в случае изменения её сопротивления или напряжения источника питания. Полупроводниковый стабилитрон представляет собой плоскостной диод, выполненный из сильно легированного кремния. Для работы стабилитрона используется участок пробоя на обратной ветви вольт-амперной характеристики, в пределах которого большие изменения обратного тока через стабилитрон вызывают малые изменения напряжения.

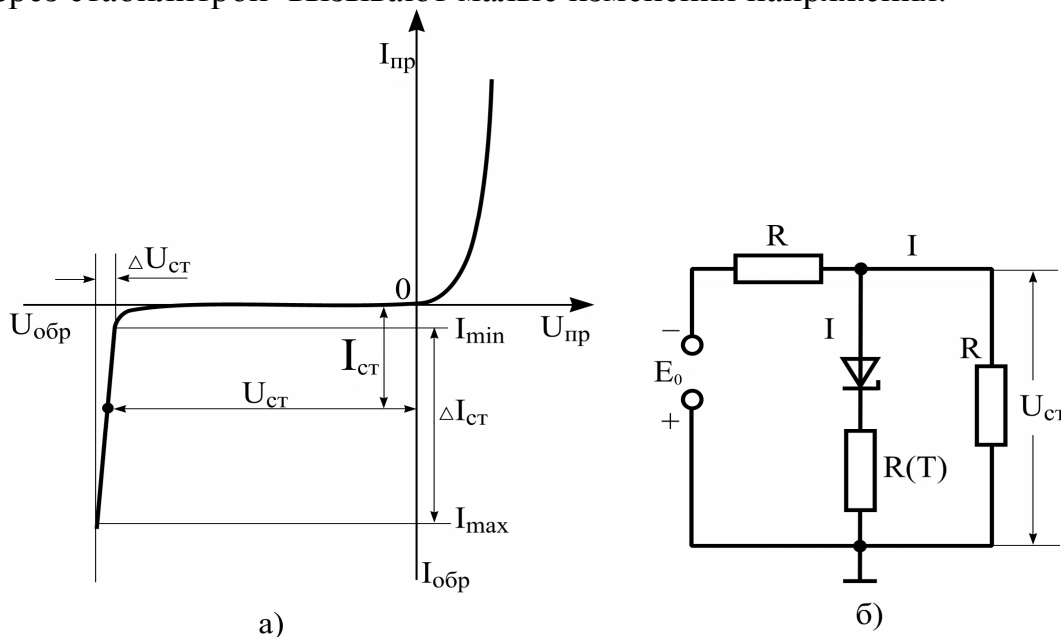


Рис.5

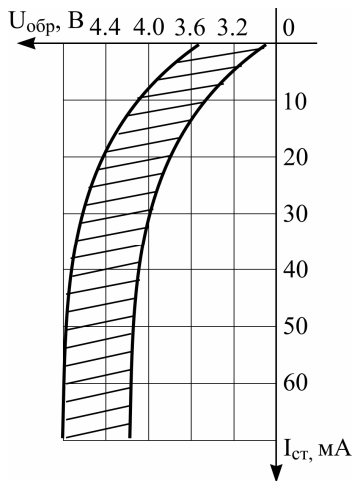


Рис. 5 в

Вначале лавинный процесс неустойчив. Поэтому интервал рабочих токов стабилизатора выбирают от  $I_{min}$ , определяемого необходимой устойчивостью работы, до  $I_{max}$ , определяемого максимально допустимой мощностью рассеивания. Стабилизатор присоединяют параллельно нагрузке  $R_n$ . Последовательно с стабилизатором включают резистор  $R(t)$  (рис. 5б). Параметрами стабилизаторов являются:

- напряжение стабилизации  $U_{ст}$ ;

- дифференциальное сопротивление в рабочей точке  $R_d = \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}}$ , характеризующее степень стабилизации;

- статистическое сопротивление в рабочей точке  $R_c = \frac{U}{I}$ ;

- коэффициент качества  $Q = \frac{R_c}{R_{\partial}}$ ;

- температурный коэффициент напряжения стабилизации  $T_{KH} = \frac{\Delta U_{ст}}{U_{ст} \cdot \Delta T}$ ,

равный отношению относительного изменения напряжения стабилизации к абсолютному изменению температуры окружающей среды.

### Туннельный диод.

Туннельный диод относится к группе полупроводниковых приборов, вольт-амперные характеристики которых имеют участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Он изготавливается из германия или арсенид галлия с высокой концентрацией примесей ( $10^{19}$ - $10^{20}$  см<sup>-3</sup>), т.е с очень малым удельным сопротивлением, в сотни или тысячи раз меньшим, чем в обычных диодах. Электронно-дырочный переход в вырожденном полупроводнике получается в десятки раз тоньше ( $10^{-6}$  см), чем в обычных диодах, а потенциальный барьер в два раза выше. Туннельный диод применяется как многофункциональный прибор (усиление, генерация, переключение и др.) для работы преимущественно в области СВЧ. Он может работать и на более низких частотах, однако его эффективность в том случае значительно ниже, чем, например, транзистора.

В основе работы туннельного диода лежит туннельный эффект, сущность которого заключается в том, что электрон, обладающий энергией, меньшей, чем

высота потенциального барьера, может проникнуть с некоторой вероятностью сквозь этот тонкий потенциальный барьер.

На рис. 6 приведены реальные (а) и (б) теоретическая вольт-амперные характеристики туннельного диода. Особенность этих характеристик в следующем: в области обратных напряжений ток диода обладает весьма малым дифференциальным сопротивлением.

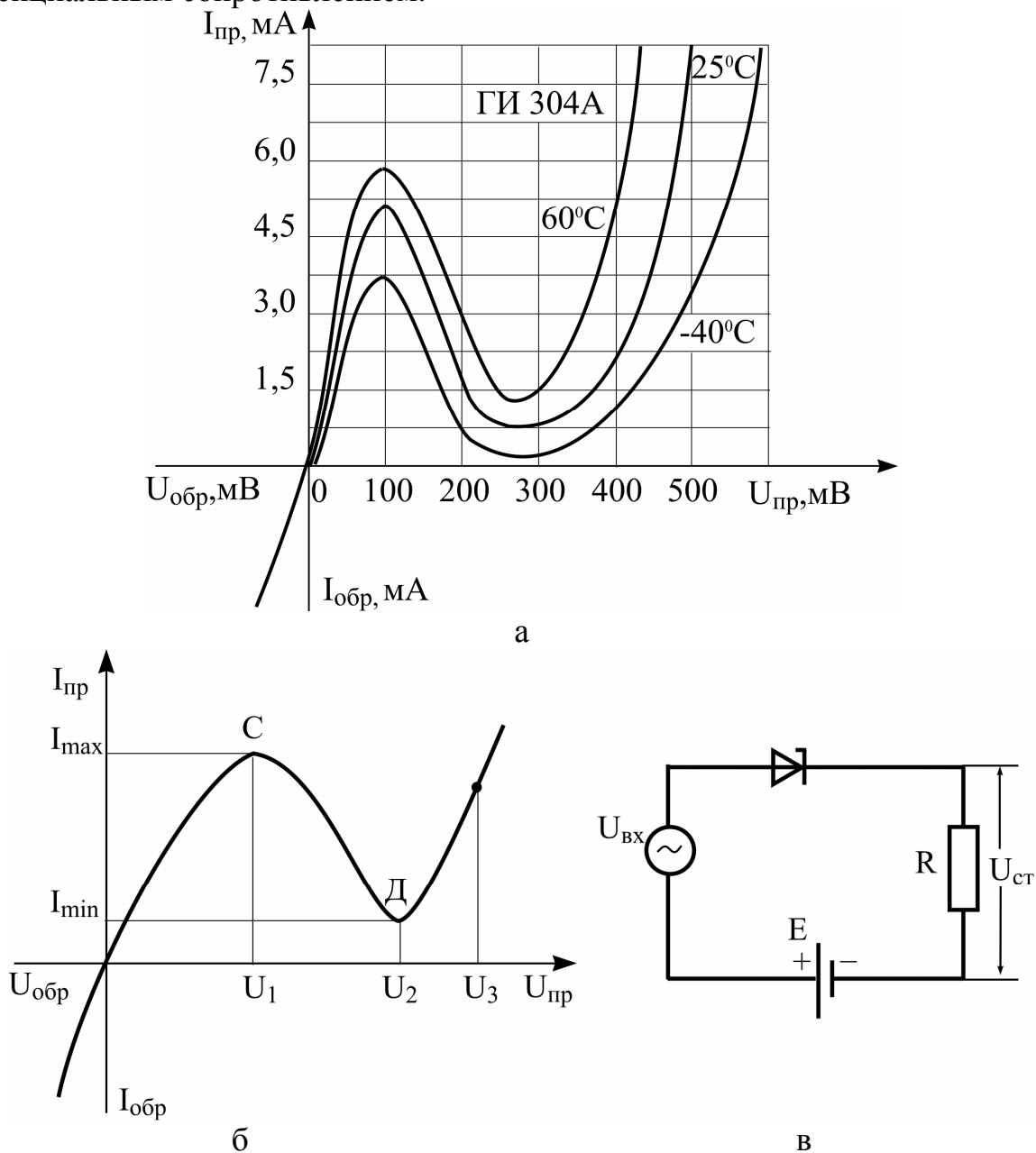


Рис. 6

В области прямых напряжения с увеличением напряжений прямой ток сначала растёт до пикового значения  $I_{max}$  при напряжении несколько десятков милливольт, а затем начинается уменьшаться (участок СД, в пределах которого туннельный диод обладает отрицательным дифференциальным сопротивлением  $R$ ). Затем ток спадает до минимального значения  $I_{min}$  при напряжении  $U_2$  порядка несколько сотен милливольт; в дальнейшем прямой ток вновь начинает увеличиваться с ростом напряжения. На рис. 6в, показана схема включения туннельного диода. Для туннельного диода можно воспользоваться аппроксимацией вольт-амперной характеристики вида:  $I = AUe^{-\alpha U} + B(e^{\beta U} - 1)$ ,

причём параметры  $A, B, \alpha, \beta$  подбираются экспериментально.

Туннельный диод характеризуется следующими основными параметрами:

- отношением токов в максимуме и минимуме вольт-амперной характеристики ( $I_{\max} / I_{\min}$ );
- отрицательной дифференциальной проводимостью (крутизной) на участке СД в точке максимума производной  $S = dI / dU$ ;
- отрицательным дифференциальным сопротивлением на участке СД в точке максимума производной  $R = dU / dI$ ;
- напряжением переключения  $\Delta U_H = U_3 - U_1$ , которое определяет возможный скачок напряжения на нагрузке при работе туннельного диода в схеме переключения;
- барьерной ёмкостью  $C(U_2)$  диода, которая обычно измеряется при минимуме тока. Ёмкость в максимуме тока равна  $C(U_1) \approx 0,8C(U_2)$ . Отличительными способностями туннельного диода являются также малое потребление мощности, устойчивость к радиационному излучению, малые габариты и масса. Влияние температуры на характеристику сравнительно невелико.

#### Обращённые диоды.

У диодов, имеющих концентрацию примеси в менее легированной области порядка  $10^{18} \text{ см}^{-3}$  в характеристике на прямой ветви почти исчезает падающий участок и она приобретает вид, показанный на рис. 7. Проводящему (прямому), направлению у этих диодов соответствует обратная ветвь вольт-амперной характеристики, а запирающему (обратному) - прямая ветвь.

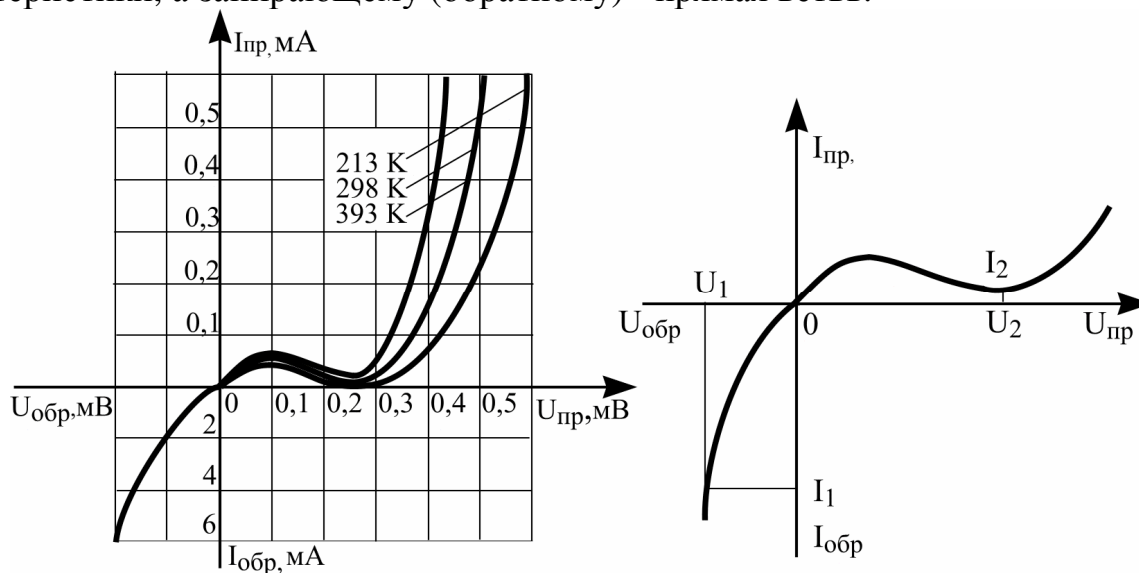


Рис. 7

Обращённый диод характеризуется следующими значениями параметров: максимальный ток в проводящем направлении  $I_1$ , ток в запирающем направлении  $I_2$ . Поскольку ток в этих приборах создаётся основными носителями заряда, обращённые диоды могут работать на более высоких частотах, чем обычные полупроводниковые диоды. «Горизонтальный» участок характеристики на прямой ветви может быть использован для стабилизации тока в цепи.



## Терморезисторы.

Терморезистор (термистор) - это полупроводниковый резистор, в котором используется зависимость электрического сопротивления от температуры.

Изменение температуры термистора, а следовательно, его сопротивление может быть вызвано либо изменением температуры окружающей среды, либо нагревом термистора проходящим через него током, либо воздействием обоих этих факторов (термисторы с прямым подогревом). Некоторые типы термисторов имеют специальную подогревную обмотку, электрически не связанную с термистором, служащих для его подогрева (термисторы косвенного подогрева).

Основные характеристики термисторов:

1. Температурная зависимость сопротивления, показывающая, как изменяется сопротивление термистора в рабочем интервале температур (рис.8а). Для большинства термисторов эта зависимость определяется отношением

$$R_{T_2} = R_{T_1} \exp \left[ \frac{B (T_1 - T_2)}{T_1 * T_2} \right],$$

где  $R_{T_1}, R_{T_2}$  - сопротивления термистора при абсолютных температурах  $T_1$  и  $T_2$  соответственно;  $B$  - постоянный коэффициент.

2. Температурный коэффициент сопротивления  $\%/град$ ,

$$TKR = \frac{\Delta R}{\Delta T * R_{20^{\circ}C}} * 100 \%,$$

где  $\Delta R$  - изменение сопротивления терморезистора, вызванное малым изменением температуры окружающей среды  $\Delta T$  (параметр рассматривается при какой-либо определённой температуре).

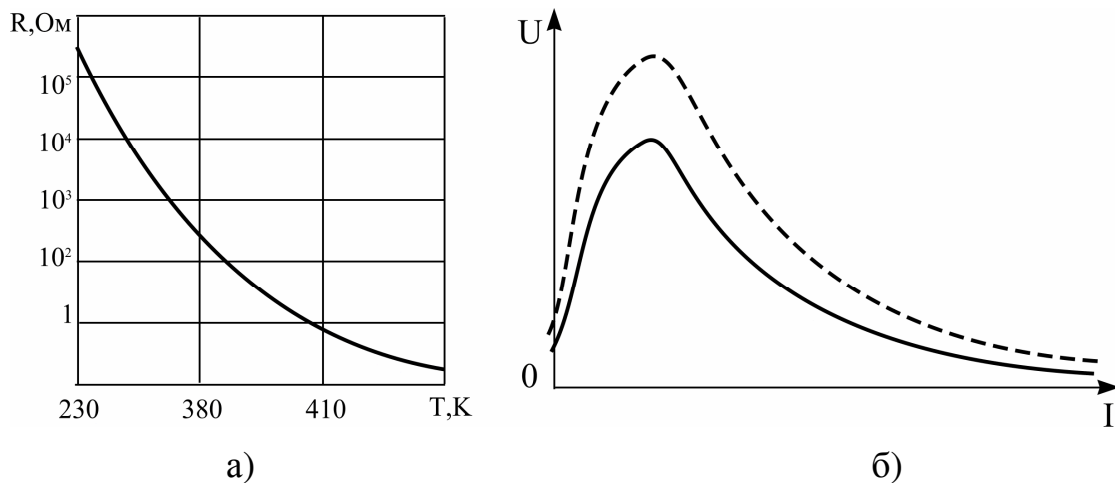


Рис. 8

Зависимость сопротивления термистора от температуры приведена на рис. 8, а. В зависимости от знака ТКР различают термисторы с отрицательным и положительным температурным коэффициентом. Термисторы с положительным ТКР называют позисторами.

3. Вольт-амперная характеристика определяет зависимость тока через термистор от приложенного к нему напряжения (при условии теплового равновесия между телом термистора и внешней средой). Типовая вольт-амперная характеристика термистора представлена на рис. 8б (пунктиром показана смещённая характеристика при более высокой температуре окружающей среды или при большем токе подогрева).

## Варисторы.

Варистор - это полупроводниковый резистор, сопротивление которого зависит от приложенного напряжения и поэтому вольт-амперная характеристика нелинейна (рис.9).

Варисторы изготавливают методом керамической технологии, т.е. путём высокотемпературного обжига заготовок из порошкообразного карбида кремния. Нелинейность вольт-амперных характеристик варисторов обусловлена явлениями на точечных контактах между кристаллами карбида кремния.

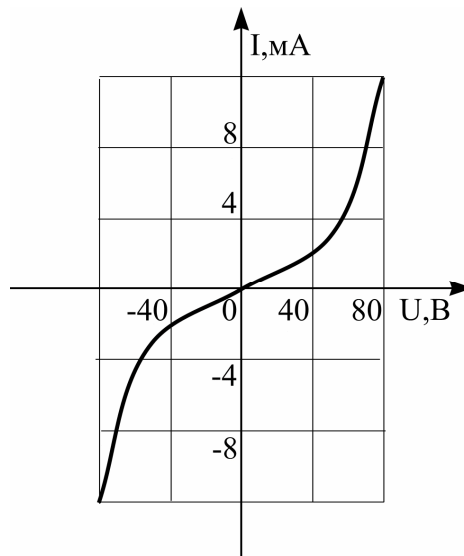


Рис. 9

Основные характеристики и параметры варистора:

- вольт-амперные характеристики, которые аппроксимируются уравнениями:  $I = AU^\beta$ ;  $U = BI$ , где  $\beta = 1/\alpha$ ,  $B = A^{-\alpha}$  - коэффициенты, величины которых зависят от типа варистора;
- коэффициенты нелинейности - отношение статистического  $R_c$  и дифференциального  $R_d$  сопротивлений при заданном постоянном напряжении на варисторе  $\beta = R_c/R_d$ ;
- температурные коэффициенты статистического сопротивления, напряжения и тока;
- частотные свойства, которые могут определяться либо инерционностью процессов, приводящих к нелинейности вольт-амперных характеристик варистора, либо собственной ёмкостью варистора.

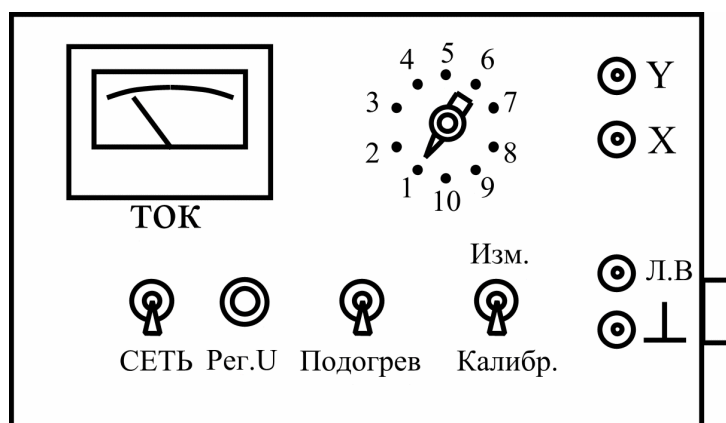
Нелинейные свойства варисторов позволяют применять их в стабилизаторах и ограничителях напряжения, в системах автоматического регулирования, для формирования импульсов, в схемах, в которых варисторы выполняют роль амплитудных, фазовых и частотных детекторов или модуляторов.

### Лабораторное задание.

1. Снять по точкам вольт-амперную характеристику германиевого диода.
2. Пользуясь осциллографом, снять вольт-амперные характеристики германиевого и кремниевого диодов, стабилитрона, обращённого и туннельного диодов, варистора и термистора.
3. Снять температурную зависимость вольт-амперной характеристики диода и термистора.

Приборы, используемые при выполнении работы:

- осциллограф;
- вольтметр, измеряющий напряжение постоянного тока;
- лабораторный макет.



Назначение органов управления на макете:

- тумблер «Сеть» служит для включения макета; источником питания является сеть 220В, 50 Гц;
- ручка «Рег. U» служит для изменения напряжения на диоде при снятии характеристики по точкам, при этом встроенный стрелочный микроамперметр измеряет ток диода; **при снятии прямой ветви характеристики ток полного отклонения составляет 5мА, при снятии обратной ветви - 100мкА;**
- тумблером «Подогрев» включается нагревательный элемент для нагрева диодов и термистора;
- тумблером «Изм.»- «Калибр» осциллограф переводится в режим калибровки по осям X и Y или в режим визуального наблюдения характеристик;
- клемма «Л.В.» служит для подключения внешнего вольтметра при снятии характеристик по точкам;
- клеммы «X», «Y» служат для подключения осциллографа;
- коммутация исследуемых двухполюсников осуществляется переключателем «Режим работы» согласно табл. 1.

Полож. переключ.	Режим работы.
1.	Прямая ветвь диода Д9 по точкам.
2.	Обратная ветвь диода Д9 по точкам.
3.	Прямая ветвь диода Д9 по осциллографу.
4.	Обратная ветвь диода Д9 по осциллографу.
5.	Прямая ветвь диода Д102 по осциллографу.
6.	Обратная ветвь диода Д102 по осциллографу.
7.	Характеристика стабилитрона КС139А по осциллографу.
8.	Характеристика обращённого диода ГИ401Б по осциллографу.
9.	Характеристика туннельного диода ГИ304 по осциллографу.
10.	Характеристика варистора СН1-2-1-56 по осциллографу.
11.	Характеристика термистора ММТ-4-100к по осциллографу.

#### Порядок выполнения работы.

Измерение вольт-амперной характеристики диода по точкам при комнатной температуре. Установить переключатель «Режим работы» в положение «1»; подключить внешний вольтметр к клеммам «Л.В» и «⊥»; подключить макет к сети 220 В, 50 Гц. Вращая ручку «Рег. U», записать показание микроамперметра и вольтметра в 7-10 точках. По результатам измерений составить таблицу, по полученным данным построить вольт-амперную характеристику.

В положении «2» переключателя «Режим работы» аналогично снимается обратная ветвь вольт-амперной характеристики. По результатам составить таблицу, по полученным данным построить вольт-амперную кривую.

2. Измерение вольт-амперных характеристик с помощью осциллографа.

В лабораторной работе используется двухканальный осциллограф GOS-7630FC, со встроенным частотомером. Осциллограф обеспечивает полосу пропускания 30 МГц и чувствительность от 1мВ/дел (с плавной растяжкой в 3 раза) до 5 В. Минимальный коэффициент развертки 0,2 мкс/дел, максимальный - 0,5 с/дел. Используя растяжку в 10 раз возможно установление времени развертки 5 с/дел.

При переводе осциллографа в режим характеристик канал 1 используется как ось X, а вход канала 2 как ось Y.

Подключить к макету на вход Y «Канал 2» а на вход X «Канал 1» осциллографа. Для переключения осциллографа в режим X необходимо ручку время/дел установить в позицию X-Y. Подсоединить клемму «⊥» макета к клемме «Земля» осциллографа. Включить осциллограф.

Выбрать при помощи переключателя «Режим работы» тип двухполюсника. Тумблер «Изм.» - «Калибр.» поставить в положение «Изм.». Манипулируя ручками «Усилитель Y», «Смещение  $\updownarrow$ », установить оптимальную величину изображения на экране. Осевые линии на сетке экрана совместить с осями координат вольт-амперной характеристики (сравните с типовыми характеристиками, приведёнными в тексте).

Аккуратно зарисовать осциллограмму. Определить масштаб осциллограммы. Для этого переключить тумблер «Изм.» - «Калибр» в положение «Калибр.». На экране осциллографа появится наклонная прямая линия (рис.10). Масштаб по оси X, В/см:  $M_x = V_{\text{кал}} / l_x$  Масштаб по оси Y, мА/см:  $M_y = I_{\text{кал}} / l_y$ . Здесь  $I_{\text{кал}}$  и  $U_{\text{кал}}$  - калибровочные напряжения и ток (их значения указаны на передней панели макета для каждого положения переключателя «Режим работы»);  $l_y$  и  $l_x$  - проекции калибровочной прямой соответственно на оси Y и X.

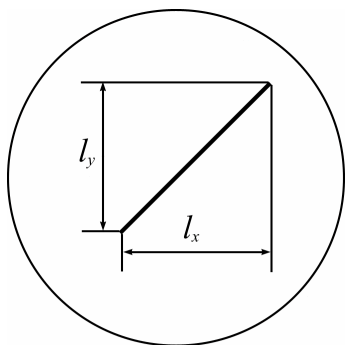


Рис.10.

При помощи полученного масштаба нанести на ось координат зарисованной осциллограммы соответствующие значения токов и напряжений.

3. Зарисовать по осциллографу вольт-амперные характеристики имеющихся двухполюсников при комнатной температуре, руководствуясь табл.1. и предыдущим пунктом описания.

4. Снять вольт-амперную характеристику диода Д9 по точкам при температуре  $60^{\circ}\text{C}$ , а по осциллографу характеристику термистора ММТ-4-100к.

#### Обработка данных эксперимента.

По полученным характеристикам рассчитать:

а) для диодов - дифференциальное сопротивление на прямом участке характеристики  $R_d = \Delta U / \Delta I$  при комнатной и повышенной температуре;

б) для стабилитрона - дифференциальное сопротивление  $R_d$ , статистическое сопротивление  $R_c$ , критерий качества Q; точку для расчёта выбрать на падающем участке характеристики;

в) для туннельного диода - отношение тока максимума к току минимума; дифференциальное сопротивление на падающем участке характеристики;

г) для варистора - коэффициент нелинейности варистора  $\beta = (U/I)(\Delta I / \Delta U)$  в рабочей точке;

д) для обращённого диода - отношение тока в проводящем и непроводящем направлении;

#### Содержание отчёта.

Отчёт должен содержать рисунки, поясняющие принцип измерения, таблицы, графики, рассчитанные параметры двухполюсников, справочные параметры, расчёт режима работы одного из диодов по постоянному току.

#### Контрольные вопросы.

Напишите и поясните теоретическую зависимость тока через переход от приложенного внешнего напряжения.

Нарисуйте ВАХ  $p-n$  перехода и реального диода. Поясните различие.

Какое явление называется пробоем диода? Виды пробоя.

Поясните зависимость ВАХ диода от температуры.

Каков принцип действия стабилитрона?

Поясните принцип действия, характеристики и параметры туннельных и обращённых диодов.

Какие физические явления положены в основу создания термисторов? Поясните разницу между термистором с отрицательным ТКР и позистором.

Поясните принцип работы варисторов. Какими уравнениями аппроксимируют ВАХ варистора?

Объясните физический смысл параметров аппроксимации прямой ветви ВАХ диода ( $R_0$ ,  $\lambda$ ,  $I_0$ ):

$$U = IR_0 + \lambda \ln\left(\frac{I + I_0}{I_0}\right).$$

10. Объясните физический смысл параметров аппроксимации ВАХ туннельного диода ( $A$ ,  $B$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ).

11. Объясните физический смысл параметров аппроксимации ВАХ стабилизатора ( $A$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ).

#### Список литературы.

1. Батушев В. А. Электронные приборы. М. : Высшая школа, 1980.
2. Пасынков В. В., Чиркин Л. К., Шинков А. Д. Полупроводниковые приборы. М. : Высшая школа, 1980.
3. Полупроводниковые приборы: диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы/ Справочник. Под ред. Н. Н. Горюнова. М : Энергоиздат, 1982.
4. Электронные приборы./Под ред. Г.Г.Шишкина М./ Энергоатомиздат, 1989.