

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»  
(Самарский университет)

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТУННЕЛЬНОГО ДИОДА

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве методических указаний к лабораторной работе

Составители:  
А.И. Колпаков,  
В.А. Колпаков,  
С.В. Кричевский

САМАРА  
Издательство Самарского университета  
2016

УДК 621.3(075)  
ББК 31.2я7

Составители: *А.И. Колпаков, В.А. Колпаков, С.В. Кричевский*

Рецензент канд. техн. наук, доц. К. Е. В о р о н о в

**Исследование статических характеристик туннельного диода:** метод. указания к лаб. работе / сост. *А.И. Колпаков, В.А. Колпаков, С.В. Кричевский*. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2016. – 28 с.

Описываются физические явления, возникающие при туннельном прохождении электрона через потенциальный барьер, изложены принципы формирования электрических характеристик туннельных и обращенных диодов и методики построения электронных схем генераторов и усилителей на основе туннельных приборов.

Предназначены для студентов направлений подготовки: 11.03.03 Конструирование и технология электронных средств, 11.03.01 Радиотехника при изучении дисциплины «Электроника». Подготовлены на кафедре «Конструирование и технология электронных систем и устройств».

УДК 621.3(075)  
ББК 31.2я7

© Самарский университет, 2016

*Учебное издание*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТУННЕЛЬНОГО ДИОДА**

*Методические указания*

Составители: *Анатолий Иванович Колпаков,  
Всеволод Анатольевич Колпаков, Сергей Васильевич Кричевский*

Редактор И.И. Спиридонова. Доверстка И.И. Спиридонова

Подписано в печать 11.09.2016. Формат 60 x 84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 1,75.

Тираж 200 экз. Заказ . Арт. – 54/2016

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени академика С.П. КОРОЛЕВА (САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Издательство Самарского университета. 443086 Самара, Московское шоссе, 34.

**Цель работы:** изучение механизмов построения разновидностей конструкций туннельных  $p$ - $n$ -переходов, анализ характера влияния их вольтамперных характеристик (ВАХ) на режимы усиления и генерации электромагнитных колебаний в электронных схемах.

**Задание:**

1. По конспекту лекций, рекомендованной литературе и данным методическим указаниям изучить теоретические основы формирования механизма проводимости в туннельном диоде и способов использования ее в электронных схемах.

2. Подготовить ответы на контрольные вопросы.

3. Выполнить предварительные расчеты.

4. Изучить порядок выполнения работы.

5. Собрать схему измерения вольтамперной характеристики туннельного диода.

6. Экспериментально определить зависимость тока от напряжения туннельного  $p$ - $n$ -перехода при температуре 300 К.

7. Определить величины максимальных и минимальных значений токов и напряжений.

8. Провести анализ полученных результатов и сделать выводы.

**Приборы и принадлежности:** туннельный диод, лабораторный стенд, вольтметр, набор проводников.

## 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

**Токи туннелирования.** Эффект туннелирования заключается в прохождении свободным электроном области потенциального барьера без изменения своей энергии и при строгом выполнении условия, что его полная энергия меньше величины потенциального барьера. Направленный поток туннелирующих электронов формирует туннельный ток, который для своего образования не требует предварительного возбуждения энергии электронов путем нагрева эмиттера (как, например, это происходит при термоэлектронной эмиссии). Это принципиальное отличие туннельного тока от тока надбарьерной эмиссии обусловлено процессом туннелирования носителей заряда сквозь потенциальный барьер, а не над потенциальным барьером, как в случае надбарьерной эмиссии (ср. рис. 1. *а, б*).

Туннелирование электрона через область потенциального барьера можно интерпретировать соотношением неопределенностей, в соответствии с которым фиксация микрочастиц в пределах потенциальной ямы делает неопределенным ее импульс. Из этого следует, что вероятность обнаружения свободного электрона в запрещенной с точки зрения классической механики области уже не равна нулю. В соответствии с этим появляется определенная вероятность прохождения (туннелирования) электрона сквозь потенциальный барьер. Вероятность такого прохождения является главным механизмом формирования физических характеристик туннельного тока. Для одномерного потенциального барьера такой характеристикой служит коэффициент прозрачности барьера, под которым понимают отношение потока прошедших сквозь него частиц к их общему потоку перед барьером.

На рис. 1 *б* приведена модель туннелирования электронов из металла в вакуум сквозь остроугольный потенциальный барьер, образуемый при наличии над поверхностью тела достаточно большого электрического поля. В этом случае толщина барьера будет уменьшаться с ростом напряжения поля, а его прозрачность – возрастать, и в результате появится ток туннельной эмиссии.

Туннелирование электронов из металла в вакуум называется автоэлектронной эмиссией. Прозрачность потенциального барьера и плотность тока автоэлектронной эмиссии можно определить при следующих допущениях:

1) состояние системы описывается моделью свободного электрона в потенциальной яме;

2) температура эмиттера  $T = 0$  К.

В этом случае зависимость прозрачности барьера от энергии электрона  $E_3$  и напряженности поля  $E$  имеет вид:

$$D(E_3, E) \sim \exp \left| \frac{\beta(E_3)^{3/2}}{eE} \right|, \quad (1)$$

где  $\beta$  – константа, зависящая от эффективной массы.

Зависимость плотности тока от напряженности поля описывается соотношением

$$j_{\text{тун}} \sim E_2 \exp(-b/E). \quad (2)$$

Анализ формулы позволяет сделать два вывода: эта зависимость справедлива при достаточно слабых полях и невысоких температурах, когда током термоэлектронной эмиссии можно пренебречь, т.е. справедлива при обычных рабочих режимах туннельного диода и ток автоэлектронной эмиссии зависит от напряженности поля так же, как ток термоэлектронной эмиссии от температуры.

На рис. 1, в приведена модель туннелирования электронов в системе металл-тонкий диэлектрик-металл.

Потенциальный барьер, созданный диэлектриком, в первом приближении имеет трапецеидальную форму (ломаная кривая 1 на рис. 1 в). С учетом сил электрического изображения форма потенциального барьера аппроксимируется параболой (кривая 2). Приложение внешнего напряжения смещает уровень Ферми на величину  $eU$  и в системе появляется результирующий туннельный ток (рис. 1 в).

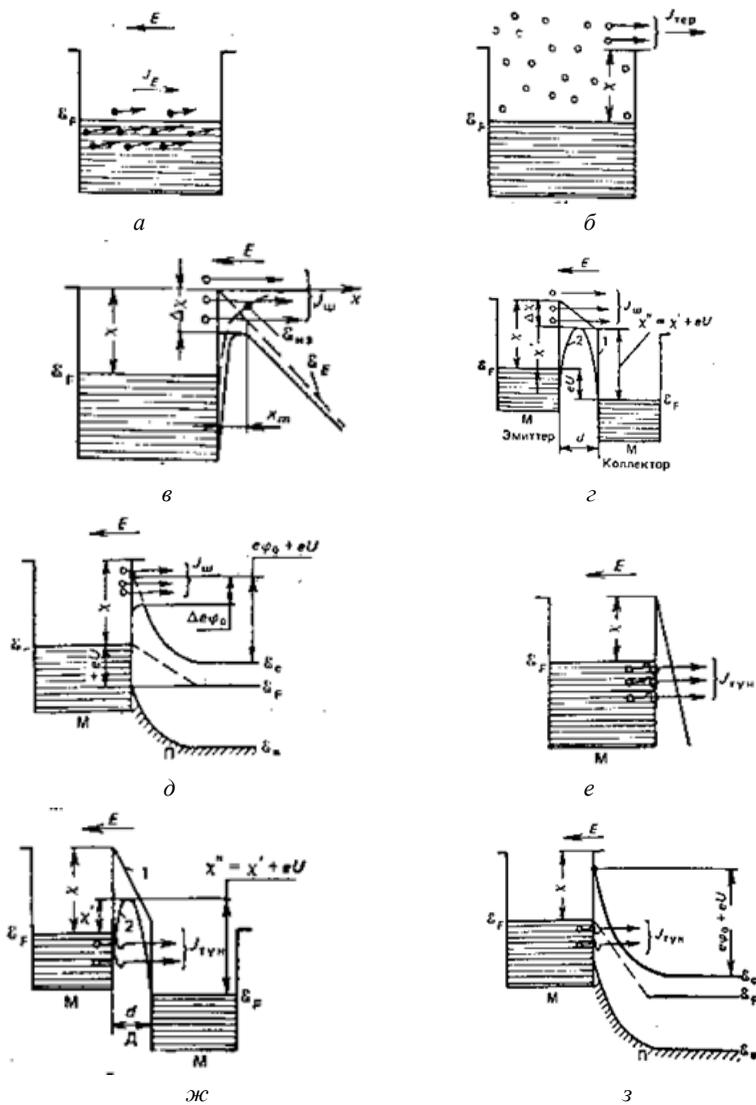


Рис. 1. Модели основных механизмов токообразования:  
 а – дрейфовый ток электронов в металле; б – ток термоэлектронной эмиссии в системе металл-вакуум; в – ток надбарьерной эмиссии в системах металл-вакуум, г – металл-диэлектрик-металл, д – металл-полупроводник, е – токи туннелирования в системах металл-вакуум, ж – металл-диэлектрик-металл, з – металл-полупроводник

Зависимость туннельного тока от приложенного напряжения с учетом сил электрического изображения имеет вид

$$I_{\text{тун}} = \exp(\beta_1 U - \beta_2 U^2) [1 - \exp(-\beta_3 U)], \quad (3)$$

где  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  – постоянные, независящие от напряжения и определяемые параметрами системы  $\chi_1, \chi_2, d$ .

В области малых напряжений экспоненты в выражении можно разложить в ряд. Ограничиваясь первыми членами разложения, получим  $I_{\text{тун}} \sim U$ , т.е. в области малых напряжений зависимость туннельного тока от напряжения линейна.

На рис. 1 *г* приведена модель туннелирования электронов сквозь остроугольный потенциальный барьер в системе металл – полупроводник. Для такой модели туннельный ток описывается выражением

$$I_{\text{тун}} = I'_s \exp(E/E_0), \quad (4)$$

где  $I'_s$  – ток, зависящий от  $E, E_0, \chi$ ;  $E$  – энергия, зависящая от приложенного напряжения;  $E_0$  – энергия, зависящая от уровня легирования полупроводника и эффективной массы электронов в полупроводнике.

Туннельный ток, определяемый выражением (4), преобладает в области низких температур. С повышением температуры к нему будет добавляться ток надбарьерной эмиссии.

**Туннельные диоды.** На основе эффекта туннелирования свободных электронов через потенциальные барьеры разработан новый класс полупроводниковых приборов – туннельные диоды. Их особенностью является наличие на вольтамперной характеристике (ВАХ) участка отрицательного сопротивления или отрицательной проводимости (рис. 2, участок *а-б*).

*Туннельные диоды имеют два типа ВАХ:*

*N-тип с участком отрицательной проводимости (ОП), на котором дифференциальная проводимость отрицательна (рис. 2 а)*

$$-\sigma_{\text{д}} = \frac{-\Delta I}{\Delta U};$$

*S-тип с участком отрицательного сопротивления (ОС) на котором дифференциальное сопротивление отрицательно (рис. 2 б)*

$$-R_{\text{д}} = \frac{-\Delta U}{\Delta I}.$$

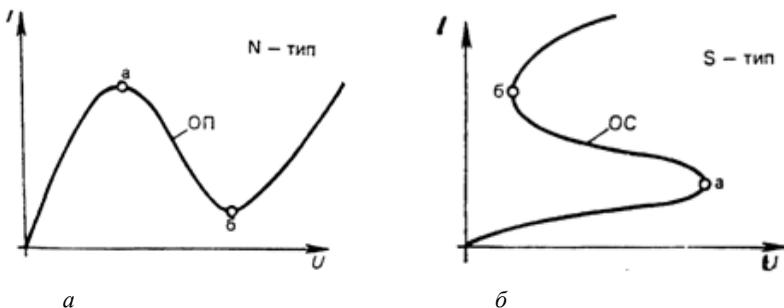


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики активного элемента:  
*a* – *N*-типа с отрицательной проводимостью, *б* – *S*-типа  
с отрицательным сопротивлением

Наличие у туннельных диодов ОС или ОП не означает, что они являются источником электрической энергии. Просто физические процессы, протекающие на участке ВАХ туннельного диода создают условия, при которых увеличению напряжения соответствует уменьшение тока, т.е. если участки ВАХ с положительным сопротивлением (как у обычного диода) рассеивают электрическую энергию (рис. 3, кривая *б*), то отрицательный участок туннельного диода ее концентрирует (рис. 3, кривая *a*).

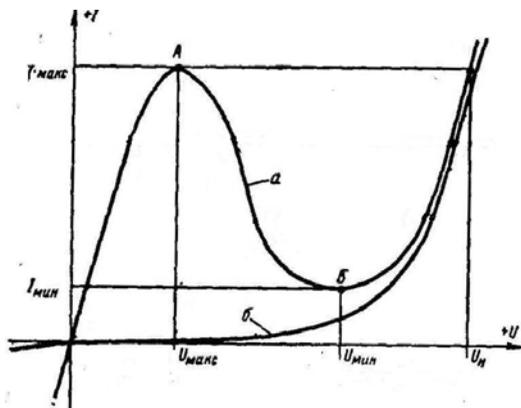


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики: *a* – туннельного, *б* – обычного диодов

При подаче энергии от внешнего источника отрицательное сопротивление выполняет роль автоматического (в случае автогенератора) или управляемого внешним сигналом (в случае усилителя) клапана, регулирующего поступление электрической энергии от источника питания в нагрузку. Подобное свойство туннельного диода позволяет построить на его основе такие приборы как генератор и усилитель синусоидальных колебаний.

Приборы с ОП или ОС в принципе обладают широкими функциональными возможностями. Наличие широкополосной отрицательной проводимости и резкая нелинейность ВАХ туннельных диодов позволяют использовать их в усилителях, генераторах, смесителях с усилением в диапазоне волн вплоть до миллиметровых. Это объясняется тем, что туннельный переход электронов происходит практически мгновенно, за время порядка  $10^{-13}$  с. Частотный предел применения туннельных диодов ограничивается лишь емкостью, сопротивлением потерь (обусловленным объемным сопротивлением полупроводника и выводов)  $p$ - $n$ -перехода и паразитной индуктивностью выводов.

На туннельных диодах строятся схемы триггеров, мультивибраторов, переключателей с очень малым временем переключения.

Туннельные диоды изготавливают на основе сильнолегированных полупроводниковых материалов, поэтому их параметры практически не зависят от температуры. Это дает возможность использовать их в широком диапазоне температур – от нескольких сотен градусов Цельсия до температур, близких к абсолютному нулю.

Легирование  $n$ - и  $p$ -областей туннельного диода до вырождения ( $N_D = N_A$  до  $10^{28}$  м<sup>3</sup>) позволяет уменьшить толщину  $p$ - $n$ -перехода  $d$  до  $10^{-8}$  м. Это на два порядка меньше, чем у обычных выпрямительных диодов. При столь малой величине  $d$  резко возрастает прозрачность  $p$ - $n$ -перехода для туннелирующих электронов (см. (3), стр. 7). Большая концентрация атомов примесей в  $n$ - и  $p$ -областях туннельного диода приводит к активному взаимодействию их потенциальных полей. С точки зрения теории энергетических диаграмм это означает расщепление примесных уровней в примесные зоны 1 и 2 (рис. 4, а), которые сливаются с зоной проводимости в  $n$ -области и с валентной зоной в  $p$ -области туннельного диода (рис. 4).

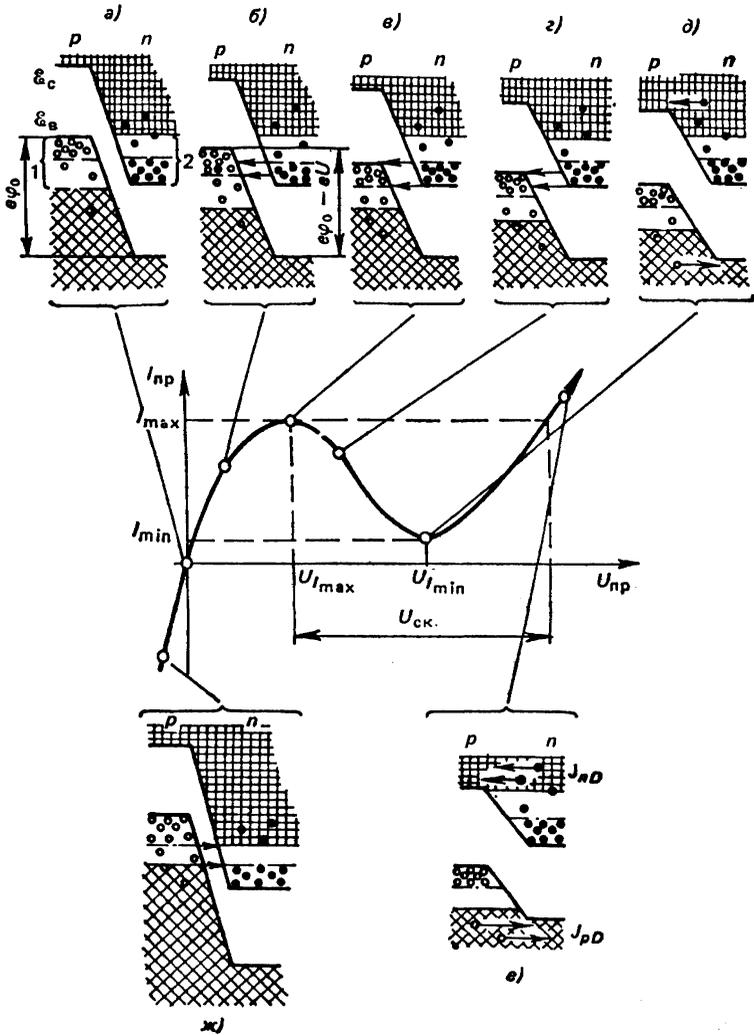


Рис. 4. Энергетические диаграммы и ВАХ туннельного диода при:  
*а* – отсутствии смещения; *б* – небольшом прямом смещении; *в* – смещении, соответствующем максимальному туннельному току; *г* – смещении, соответствующем участку с ОП; *д* – смещении, соответствующем нулевому туннельному току; *е* – смещении, вызывающем диффузионный ток; *ж* – обратном смещении (*1* – зона акцепторных примесей; *2* – зона донорных примесей)

Если на туннельный диод подать небольшое прямое смещение  $eU$  то электроны из зоны проводимости будут переходить (согласно закону туннелирования) на противостоящие им свободные уровни валентной зоны (рис. 4 б). С увеличением прямого смещения прямой туннельный ток будет возрастать и станет наибольшим, когда максимальной концентрации электронов в примесной зоне будет соответствовать максимальное число свободных уровней в валентной зоне (рис. 4 в). При дальнейшем повышении прямого смещения перекрытие уровней  $E_c$  и  $E_v$  будет уменьшаться, что приведет к снижению туннельного тока (рис. 4 г), и когда уровень  $E_c$  сравняется с уровнем  $E_v$ , туннелирование электронов прекратится (рис. 4 д). При этом прямой ток не уменьшится до нуля, так как с повышением прямого смещения начинают возрастать диффузионные потоки  $J_{nD}$  и  $J_{pD}$  электронов и дырок через переход (рис. 4 е). Эта часть ВАХ туннельного диода подобна ВАХ обычного  $p$ - $n$ -перехода.

При обратном смещении электроны туннелируют из валентной зоны  $p$ -полупроводника, где их концентрация велика, на свободные уровни зоны проводимости  $n$ -полупроводника (рис. 4 ж). При этом обратный туннельный ток резко возрастает с напряжением и обратная ветвь ВАХ идет круто вниз, т.е. туннельный диод, в отличие от обратного тока выпрямительного диода, обладает высокой проводимостью при обратном включении.

**Электрические свойства.** Вырожденные полупроводники переходят в режим собственной электропроводности при более высоких температурах, именно поэтому туннельные диоды способны работать при более высоких рабочих температурах, по сравнению с другими биполярными приборами.

Из-за малости времени туннелирования электрона через потенциальный барьер ( $10^{-13}$  с) предельная частота туннельных диодов определяется их конструктивно-технологическими особенностями: индуктивностями выводов  $L_s$ , емкостью  $p$ - $n$ -перехода  $C_{бар}$ , сопротивлениями растекания и контактов  $r_s$  (рис. 6).

Применение современных технологий позволило создать приборы с частотами до 40 ГГц.

Основные параметры туннельного диода:

1. Токи  $I_n$ ,  $I_g$  и напряжения  $U_n$ ,  $U_g$ , соответственно, параметры пика и впадины прямой ветви ВАХ.

2. Напряжение скачка  $U_{ск}$  – перепад напряжения между точкой максимального туннельного тока  $I_n$  и второй восходящей ветви ВАХ, при котором прямой ток также равен току пика  $I_n$ . Этот параметр характеризует достижимые перепады напряжения, которые можно получить на нагрузочном сопротивлении при работе туннельного диода в схемах релаксационного генератора или с двумя устойчивыми состояниями.

3. Отношение тока пика к току впадины  $\frac{I_n}{I_g}$ .

Напряжения  $U_n$  и  $U_g$  имеют малый разброс при изготовлении туннельных диодов из однородного материала, поэтому крутизна падающего участка ВАХ может быть определена отношением  $\frac{I_n}{I_g}$ .

Туннельные диоды, выполненные из кремния, имеют  $\frac{I_n}{I_g} = 3$ . Это чрезвычайно малое значение, поэтому кремний практически не используется для изготовления туннельных диодов высокочастотного типа.

Сопротивление туннельного диода на высоких частотах при малом синусоидальном сигнале можно определить из выражения:

$$\dot{z} = \left( r_s + \frac{g}{g^2 + w^2 C_{бар}^2} \right) + j \left( wL_s - \frac{wC_{бар}}{g^2 + w^2 C_{бар}^2} \right), \quad (5)$$

где  $g = 1/r_d$  – отрицательная дифференциальная проводимость, характеризующая величину угла наклона падающего участка ВАХ. В большинстве практических расчетов используют понятие отрицательного дифференциального сопротивления, которое в интервале напряжений  $(U_n - U_g)$  соответствует равенству

$$r_d = \frac{dU}{dI} - r_s \approx - \frac{|U_n - U_g|}{|I_n - I_g|}.$$

При работе на падающем участке ВАХ выполняется неравенство  $g < 0$ . Из этого следует, что действительная часть (5) меньше нуля, т.е. справедливо неравенство

$$r_s + \frac{g}{g^2 + w^2 C_{\text{бар}}^2} < 0. \quad (6)$$

Решая (6) относительно  $r_s$  получим:

$$r_s < \frac{g}{g^2 + w^2 C_{\text{бар}}^2}. \quad (7)$$

Определим частоту, при которой (3) обращается в равенство

$$w_{\text{кр}} = \frac{|g|}{C_{\text{бар}}} \sqrt{\frac{1}{|g| r_s} - 1}. \quad (8)$$

Следует отметить, что при более высоких частотах активная составляющая сопротивления диода положительна. Предельную частоту работы туннельного диода в режиме отрицательного дифференциального сопротивления определим из (8) путем преобразования его к виду

$$f_{\text{кр}} = \frac{1}{2\pi |r_{\text{д}}| C_{\text{бар}}} \sqrt{\frac{|r_{\text{д}}|}{r_s} - 1}. \quad (9)$$

Анализ (9) на экстремальное значение  $r_s$  показывает, что максимальную рабочую частоту прибора можно получить, если выполнить равенство  $|r_{\text{д}}| = 2r_s$ . При выполнении этого условия максимальное значение частоты можно определить из выражения

$$f_{\text{max}} = \frac{1}{4\pi r_s C_{\text{бар}}}. \quad (10)$$

Из (10) следует, что основной вклад в процесс формирования частотных свойств туннельных диодов вносит произведение  $r_s C_{\text{бар}}$ , наиболее эффективно повысить частоту можно путем уменьшения  $C_{\text{бар}}$ . Однако из (9) следует, что уменьшение  $C_{\text{бар}}$  за счет уменьшения площади  $p$ - $n$ -перехода приведет к снижению величины максимального тока, а, следовательно, и к увеличению модуля отрицательного дифференциального сопротивления, поэтому значение частоты не изменится. Для устранения этой неопределенности в большинстве практических случа-

ев высокочастотные свойства (быстродействие) туннельного диода оценивают по увеличению отношения  $I_n/C_{бар}$ .

Предельную частоту туннельного диода определяет величина резонансной частоты паразитных колебаний  $w_p$ , которую можно определить из (5), приравняв мнимую часть нулю:

$$w_p L_s - \frac{w_p C_{бар}}{g^2 + w_p^2 C_{бар}^2} = 0. \quad (11)$$

Решая (11) относительно резонансной частоты получим

$$w_p = \sqrt{\frac{1}{L_s C_{бар}} - \left(\frac{1}{r_d C_{бар}}\right)^2}, \quad (12)$$

или

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_s C_{бар}} - \left(\frac{1}{r_d C_{бар}}\right)^2}. \quad (13)$$

Анализ выражений (9) и (13) показывает, что при выполнении неравенства

$$L_s < r_s C_{бар} r_d. \quad (14)$$

будет выполняться и условие  $w_p > w_{кр}$ .

Выражения (9), (13) и (14) накладывают конструктивно-технологические ограничения на использование туннельных диодов. Так, например, для уменьшения  $L_s$  необходимо выводы диода изготавливать не из тонких проводов, а из металлических мембран, ленточных лепестков и пластин.

Максимальная мощность в нагрузке генератора, содержащего туннельный диод, связана с его параметрами соотношением

$$P = 0,12 \frac{|U_n - U_e|}{|I_n - I_e|}.$$

### **Генераторы синусоидальных колебаний на туннельном диоде.**

Туннельный диод, благодаря чрезвычайно широкому частотному диапазону, малой потребляемой мощности и высокой температурной стабильности является почти идеальным прибором для построения мини-

тюрных, высокостабильных, широкодиапазонных генераторов. Двухполюсная структура прибора обуславливает весьма простое построение электронных схем генераторов, собираемых на туннельных диодах. В отличие от ламповых и транзисторных, такие генераторы не требуют подачи внешней обратной связи, она уже присутствует в самом диоде.

В колебательном контуре за счет энергетических потерь всегда имеется затухание электромагнитного колебания при его прохождении через электронную схему генератора. Отрицательное сопротивление туннельного диода позволяет уничтожить потери в контуре и получить в нем незатухающие колебания. Наиболее просто это осуществляется в схеме с туннельным диодом, представленной на рис. 5.

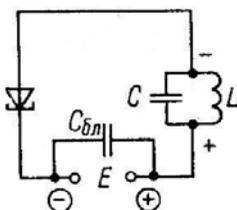


Рис. 5. Простейшая схема включения туннельного диода в контур для генерации колебаний

При включении питания в любом параллельном LC контуре возникают свободные колебания, которые, при наличии в схеме активных потерь, со временем затухают. Пусть диод и источник питания выбраны такими, что рабочая точка находится на падающем участке характеристики (рис. 2 а, участок а-б). Во время первого полупериода конденсатор С заряжается, формируя заряды на электродах таким образом, как показано на рис. 5. Согласно второму закону Кирхгофа это приводит к уменьшению величины напряжения на электродах туннельного диода. Однако в этот же момент времени эффект отрицательного дифференциального сопротивления приведет к возрастанию тока, который и компенсирует активные потери, добавив энергию в контур. Если величина этой энергии станет равной или больше энергии активных потерь, то колебания в контуре примут незатухающий характер.

Переход электронов через потенциальный барьер туннельного диода происходит в чрезвычайно малые промежутки времени, порядка  $10^{-12}$  с, поэтому туннельные диоды хорошо работают на высоких частотах, включая диапазон СВЧ. В этом случае на практике чаще всего в качестве конденсатора  $C$  используют внутреннюю реактивность самого диода. Простейший генератор синусоидальных колебаний СВЧ-диапазона можно построить по схеме, приведенной на рис. 6. Здесь  $C_d$  – внутренняя емкость диода, образующая последовательный колебательный контур с индуктивностью  $L$ .

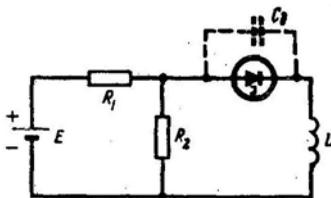


Рис. 6. Простейший последовательный контур генератора синусоидальных колебаний на туннельном диоде

Для самовозбуждения такой схемы достаточно выполнения условия:

$$R_3 < |-r_d| \text{ и } L_3 > R_3 |-r_d| C_d,$$

где  $r_d$  – дифференциальное отрицательное сопротивление участка  $a-b$  ВАХ туннельного диода,  $R_3$  – эквивалентное активное сопротивление, включенное последовательно с диодом,  $L_3$  – эквивалентная индуктивность, включенная последовательно с диодом,  $C_d$  – паразитная внутренняя емкость диода.

Для достижения требуемого эффекта рабочая точка туннельного диода смещается от источника постоянного напряжения в область ВАХ с отрицательным наклоном (рис. 2 а, участок  $a-b$ ). При этом активное суммарное сопротивление, включенное последовательно с диодом, должно быть меньше  $|-r_d|$ . Если при этом  $L_3 \approx R_3 |-r_d| C_d$ , то колебания будут весьма близки к синусоидальным, но их амплитуда будет мала. При увеличении индуктивности амплитуда автоколебаний возрастает, однако увеличивается и содержание гармоник в генерируемом колеба-

нии. Частота генерации схемы, показанной на рис. 6, определяется по формуле

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_3 C_D} - \frac{R_3}{L_3 C_D |r_D|}}.$$

Максимальный размах напряжения на электродах генератора примерно равен разности напряжений  $U_{\min} - U_{\max}$  (см. рис. 1). Тогда максимальную мощность, развиваемую автогенератором на одном туннельном диоде, можно определить из выражения

$$P_{\max} = \frac{1}{8} (U_{\min} - U_{\max})(I_{\max} - I_{\min}).$$

При этом рабочая точка совершает колебания от точки пика характеристики (рис. 1, точка *a*) до впадины (рис. 1, точка *б*). Вследствие нелинейности характеристики, вблизи этих точек форма колебаний будет значительно искажена. Если необходима «чистая» синусоида, то надо уменьшать выходную амплитуду и мощность.

Типовое значение мощности для генераторов на одном туннельном диоде с пиковым током до 10 мА лежит в пределах от единиц милливольт до десятков микроватт. Для получения большей мощности необходимо применять диоды с большими пиковыми токами или использовать параллельное и последовательное соединение диодов. Так, например, наибольшую выходную амплитуду можно получить в параллельном генераторе вида (рис. 7).

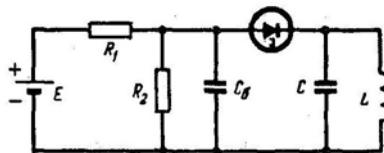


Рис. 7. Простейший параллельный генератор синусоидальных колебаний на туннельном диоде

Увеличение выходной амплитуды в этом генераторе происходит вследствие того, что конденсатор шунтирует по переменной составляющей сопротивление смещения, и активное сопротивление на частоте генерации практически равно сопротивлению потерь туннельного диода.

Наилучшую стабильность колебаний можно получить, собрав генератор по параллельно-последовательной схеме, показанной на рис. 8.

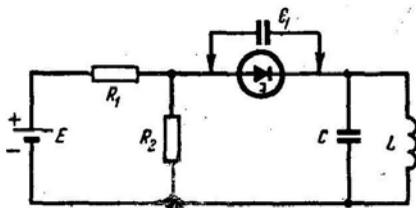


Рис. 8. Простейший параллельно-последовательный генератор синусоидальных колебаний на туннельном диоде

Частота генерации такой схемы определяется по формуле

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L(C+C_D)} - \frac{1}{|-r_D|^2 C_D(C+C_D)}}.$$

При низких частотах генерации параллельно диоду обычно подключают дополнительную емкость ( $C_1$ ). Для получения стабильных колебаний в этой схеме необходимо выполнение условия

$$R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_{\Pi} \approx \frac{|-r_D|}{1 + \omega_0^2 |-r_D|^2 (C_1 + C_D)^2},$$

где  $R_{\Pi}$  – сопротивление потерь туннельного диода.

Таким образом, последовательный генератор наиболее прост и имеет максимальную рабочую частоту, параллельный генератор – наибольшую выходную мощность, а параллельно-последовательный – наилучшую стабильность и форму сигнала.

### Усилители синусоидальных колебаний на туннельном диоде

Принцип действия усилителя с туннельным диодом проще всего реализуется при его последовательном включении с цепью входного сигнала (рис. 9)

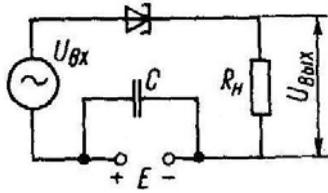


Рис. 9. Схема усилителя с туннельным диодом

Допустим, что генератор напряжения с некоторым внутренним сопротивлением  $R_r$  нагружен на активную нагрузку  $R_n$ , т.е. туннельного диода в схеме нет. Тогда, при выполнении условия  $R_r = R_n$ , максимальную мощность, отдаваемую в нагрузку, можно определить, используя равенство:

$$P_{n.\text{макс}} = u^2/4R_n.$$

Если в схему добавить туннельный диод (рис. 9) с отрицательным дифференциальным сопротивлением, равным по абсолютному значению  $|-r_d|$ , то на нагрузке будет уже выделяться мощность

$$P_n = \left( \frac{u}{R_n + R_r - r_d} \right)^2 R_n.$$

Из этого выражения следует, что при включении отрицательного сопротивления на нагрузке стала выделяться большая мощность. Взяв, например,  $|-r_d| = R_r = R_n$ , получим

$$P_n = \frac{u^2}{R_n} = 4P_{n.\text{макс}}.$$

Поскольку усилительный элемент является двухполюсником, то обычные для ламповых и транзисторных схем понятия «вход» и «выход» здесь неприменимы. Для количественной характеристики такого усилителя пользуются коэффициентом вносимого сопротивления по мощности  $K_{P_{вн}}$ . Этот коэффициент, равный отношению мощностей в нагрузке при включенном и выключенном отрицательном сопротивлении, показывает, какую мощность вносит в нагрузку активный двухполюсник (туннельный диод) по сравнению с пассивной цепью.

Для схемы на рис. 9 имеем:

$$K_{P_{\text{вн}}} = \frac{4R_{\Gamma}R_n}{(R_n + R_{\Gamma} - r_{\text{д}})^2}.$$

При  $(R_n + R_{\Gamma}) \rightarrow |r_{\text{д}}|$  получаем  $K_{P_{\text{вн}}} \rightarrow \infty$ , и схема становится неустойчивой. Поэтому для нормальной работы такого усилителя необходимо, чтобы выполнялось неравенство:

$$(R_n + R_{\Gamma}) < |r_{\text{д}}|.$$

При названном условии исходная рабочая точка Т (рис. 10) может быть установлена на середине падающего участка (эта точка является пересечением линии нагрузки с характеристикой диода).

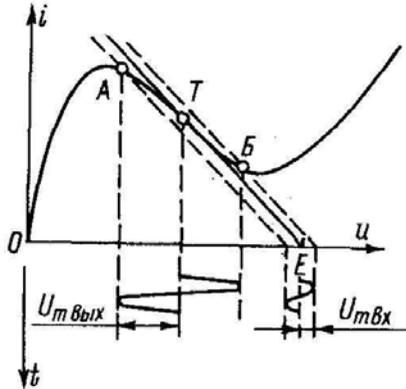


Рис. 10. График, поясняющий процесс усиления

При подаче входного напряжения с амплитудой  $U_{\text{мвх}}$  линия нагрузки будет «совершать колебания», перемещаясь параллельно самой себе. Ее крайние положения (штриховые линии) определяют конечные точки рабочего участка  $a$ - $b$ . Проектируя эти точки на ось напряжений, получим амплитуду выходного напряжения  $U_{\text{мвых}}$ , которая оказывается значительно больше амплитуды входного.

Такая особенность усилителя на туннельном диоде как отсутствие отдельных входной и выходной цепи создает некоторые трудности при осуществлении схем с несколькими каскадами усиления. Усилители на

туннельных диодах могут давать значительное усиление при невысоком уровне шумов и работают устойчиво.

**Обращенный диод.** Высота потенциального барьера перехода  $e\phi_0$  зависит от уровней легирования  $n$  – и  $p$ -областей диода. При соответствующем легировании можно добиться того, чтобы в отсутствие напряжения  $E_c$  и  $E_v$  расположились на одном уровне (рис. 11 *а*).

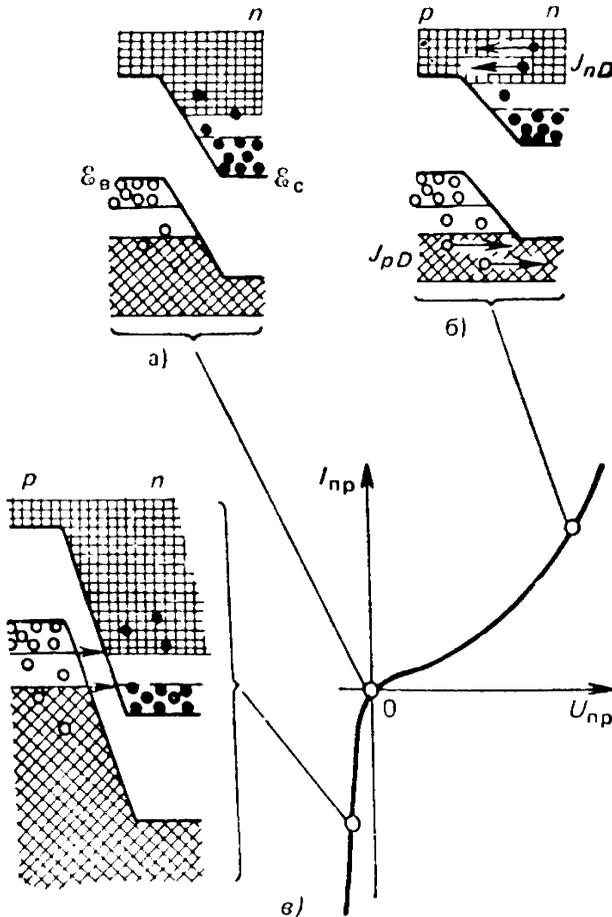


Рис. 11. Энергетические диаграммы и ВАХ обращенного диода при: *а* – отсутствии смещения; *б* – прямом смещении; *в* – обратном смещении

Такие диоды называют *обращенными*. У обращенных диодов при прямом смещении туннельный ток отсутствует и *прямая ветвь ВАХ* определяется диффузионными составляющими токов электронов и дырок, как у обычных диодов (рис. 11, б). Обратная ветвь ВАХ у таких диодов определяется туннелированием электронов (рис. 11, в). Обращенные диоды являются разновидностью туннельных диодов и используются в радиотехнических устройствах как детекторы, смесители при малых уровнях сигналов, а также в ключевых устройствах при сигналах с малыми амплитудами.

Обращенные диоды используют также в качестве выпрямительных элементов электронных схем, в которых для обработки сигналов малой амплитуды (до 0,3–0,4 В) необходимо, чтобы величина обратного тока на несколько порядков превышала прямой ток. Таким образом, при применении обращенных диодов, их обратную ветвь ВАХ используют как прямую обычных диодов, а прямую – как обратную. Из этого следует, что принцип работы обращенных диодов обусловил и их название.

В заключение необходимо отметить, что при туннельном переходе электрон не затрачивает тепловой энергии и туннельный диод может работать при очень низкой температуре, при которой обычные полупроводниковые диоды и транзисторы перестают работать. С другой стороны, обладая *n*- и *p*-областями с вырожденной проводимостью, туннельный диод может работать также и при более высокой температуре, чем обычные полупроводниковые приборы.

Свойства и параметры вырожденных полупроводников, идущих на изготовление туннельных диодов, оказываются мало чувствительными к различным условиям внешней среды, например, к радиации, большой влажности, поэтому туннельные диоды и их разновидности являются очень перспективными для применения в электронных схемах.

## 2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Для снятия вольтамперной характеристики  $p$ - $n$ -перехода тунельный диод включают в схему (рис. 12).

Далее проводят следующие операции:

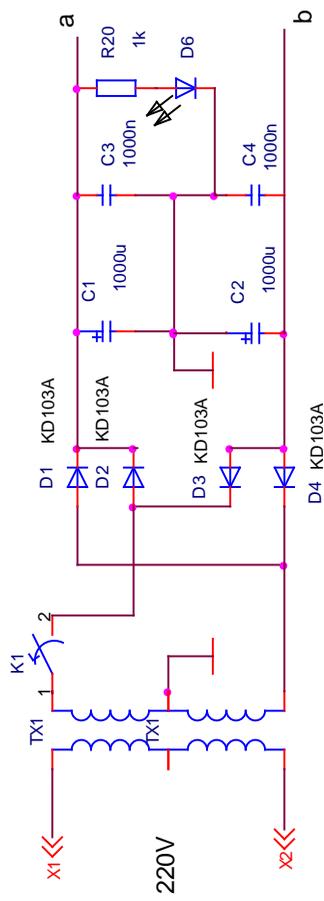
1. Тумблером «Сеть» включить установку.

2. Переставить переключатели К1 и К2 в режим измерения прямой характеристики диода. Вращая ручку потенциометра, устанавливать напряжение так, чтобы иметь для построения не менее 10 точек вольтамперной характеристики при среднем шаге 20-30 мВ. В случае резкого изменения тока ( $U'$ ) шаг резко сбавить. Переключить переключатели К1 и К2 в режим измерения обратной характеристики. Снять характеристику по методике п. 2.

3. Переключатель режимов установить в положение «Генерация». Включить осциллограф тумблером «Сеть». Поставить тумблер «Напряжение – Ток» в положение «Напряжение», подключая тем самым осциллограф параллельно диоду. Возникновение колебаний обнаруживается осциллографом при соответствующем положении ручек «Усиление» и «Синхронизация». После возникновения устойчивых колебаний отрегулировать изображение на экране осциллографа и зарисовать колебания напряжения. Измерить амплитуду колебаний напряжения  $U_{\text{генер}}$ . Затем тумблер «Напряжение – Ток» перевести в положение «Ток», подключая тем самым осциллограф параллельно резистору. При этом осциллограф покажет колебания тока, значение которого можно определить по формуле:

$$\Delta J = \frac{\Delta U'}{R},$$

где  $\Delta U'$  – значение напряжения на экране осциллографа;  $R$  – сопротивление амперметра,  $R = 20$  Ом. Зарисовать форму колебаний тока и измерить размах этих колебаний.



a

Рис. 12. Схема электрическая принципиальная для снятия ВАХ туннельного диода

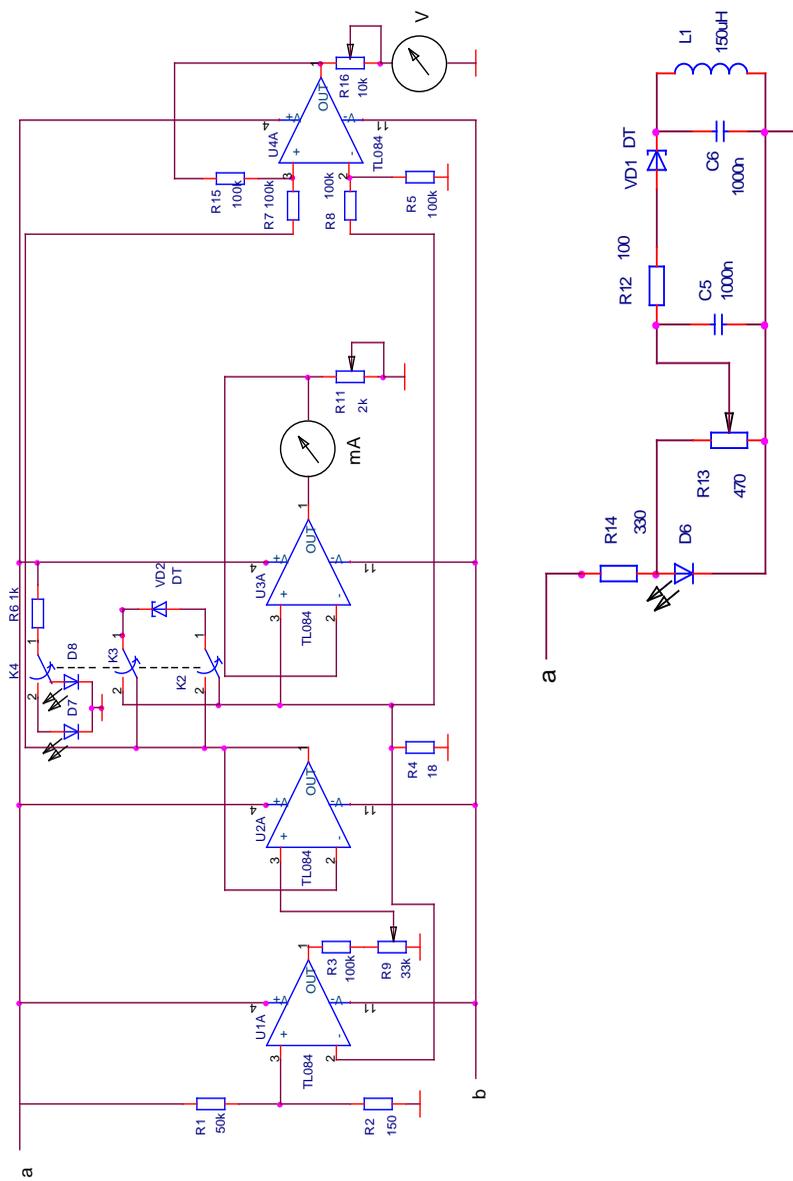


Рис. 12. Схема электрическая принципиальная для снятия ВАХ туннельного диода (продолжение)

### 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с правилами работы приборов экспериментальной установки.

2. Включить электропитание лабораторного стенда и прогреть приборы в течении 5-15 мин.

3. Вычертить табл. 1 и 2 для получения прямой и обратной ветвей ВАХ туннельного диода.

Таблица 1

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Прямой ток $I_{пр}$ , мА										
Прямое напряжение $U_{пр}$ , мВ										

Таблица 2

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Обратный ток $I_{обр}$ , мА										
Обратное напряжение $U_{обр}$ , мВ										

4. Вычертить схему координат для изображения ВАХ туннельного диода (масштаб по осям:  $I_{пр}$  ( $I_{обр}$ ) – в 1 см 2 мА;  $U_{пр}$  ( $U_{обр}$ ) – в 1 см 0,1 В).

5. Снять прямую ветвь ВАХ и занести результаты измерений в табл. 1.

6. Снять обратную ветвь ВАХ и занести результаты измерений в табл. 2.

7. Построить ВАХ туннельного диода в координатных осях.

8. Рассчитать  $r_s$ .

#### **4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА**

Отчет выполняется на листах формата А4 и начинается с титульного листа. Отчет содержит:

1. Цель работы
2. Задание.
3. Перечень приборов, используемых в эксперименте.
4. Используя схему электрическую принципиальную начертить блок-схему лабораторного стенда.
5. Результаты экспериментальных исследований в форме расчетов, графиков и таблиц.
6. Выводы с кратким изложением физических основ работы туннельного диода.

#### **5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Основные механизмы токопрохождения в туннельном диоде.
2. Модель тока термоэлектронной эмиссии в системе металл-вакуум.
3. Описать механизм токов надбарьерной эмиссии в системе металл-вакуум.
4. В чем заключаются особенности дрейфа электронов в металле?
5. Определить зависимость тока от напряжения.
6. Классификация туннельных диодов по вольтамперной характеристике.
7. Провести анализ вольтамперных характеристик обычного и туннельного диодов.
8. Каковы особенности энергетических диаграмм туннельного диода при прямом смещении?
9. Каковы особенности энергетических диаграмм туннельного диода при обратном смещении?
10. Основные параметры туннельного диода.

11. Какими параметрами туннельного диода определяется отрицательное дифференциальное сопротивление?
12. Какими параметрами туннельного диода определяется предельная частота?
13. Принцип работы туннельного диода в режиме генерации электромагнитных колебаний.
14. Принцип работы туннельного диода в режиме усиления электромагнитных колебаний.
15. Какие особенности механизма формирования энергетических диаграмм обращенного диода при прямом смещении?
16. Какие особенности механизма формирования энергетических диаграмм обращенного диода при обратном смещении?
17. Из каких полупроводниковых материалов изготавливают туннельные и обращенные диоды?
18. При каких условиях формируются прямая и обратная ветви вольтамперной характеристики туннельного диода?
19. Принцип работы экспериментальной установки.

## **6. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Горюнов, Н.Н. Схемы на туннельных диодах. / Н.Н. Горюнов, А.Ф. Кузнецов, А.А. Экслер. – М.: Энергия, 1965. – 80 с.
2. Чжоу, В.Ф. Принципы построения схем на туннельных диодах / В.Ф. Чжоу / пер. с англ. – М.: Мир, 1966 – 448 с.
3. Жеребцов, И.П. Основы электроники. / И.П. Жеребцов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990 – 352 с.