

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

*Цель работы:* изучить принцип действия и характеристики полупроводниковых диодов. Ознакомиться с методикой снятия вольт-амперных характеристик

#### Основные теоретические сведения

*Полупроводниковым диодом* называют полупроводниковый прибор с одним электрическим *p-n* переходом и двумя выводами. По функциональному назначению диоды делятся на выпрямительные, импульсные, стабилитроны, варикапы, туннельные, фотодиоды, светодиоды и др.

#### 1. Принцип действия полупроводникового диода

Работа полупроводникового диода основана на односторонней проводимости *p-n* перехода. *p-n* переход – переход между двумя областями полупроводника с различным типом проводимости.

При сплавлении двух образцов полупроводников с электронной и дырочной проводимостями на границе, вследствие явления диффузии, электроны из области *n* будут перемещаться в область *p*, а дырки, наоборот, из области *p* в область *n*. Встречаясь на границе *p* и *n* областей, дырки и электроны рекомбинируют, вследствие чего в приграничной зоне концентрация носителей заряда существенно снижается. Со стороны области *n* обнажаются положительно заряженные ионы, а со стороны области *p* – отрицательно заряженные ионы (рис.1.1). Между ними возникает внутреннее электрическое поле  $E_{зс}$  (пространственный заряд), направленное от области *n* к области *p*. Это электрическое поле препятствует движению (диффузии) электронов из *n*-области в *p*-область и дырок в обратном направлении. Однако это поле не препятствует движению (дрейфу) через переход неосновных носителей, имеющихся в областях полупроводника. При комнатной температуре ток диффузии компенсируется током дрейфа – *p-n* переход находится в термодинамическом равновесии.

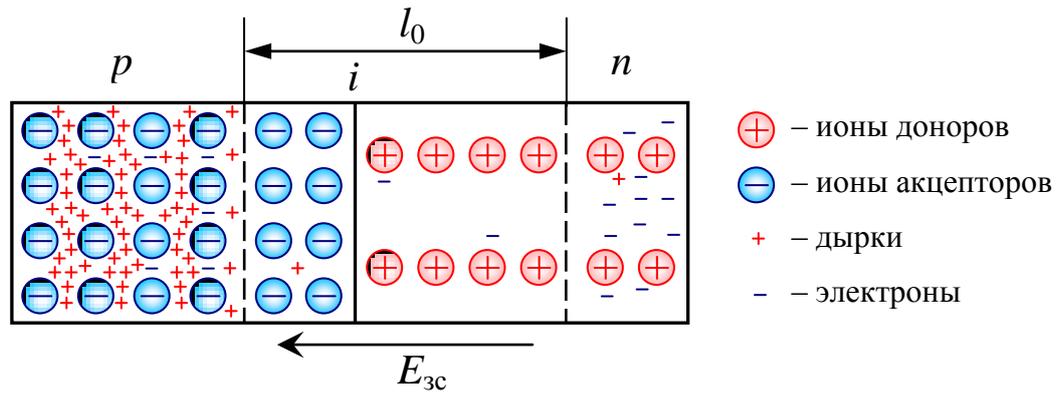


Рисунок 1.1 – Возникновение запирающего слоя в  $p$ - $n$  переходе

Область  $p$ - $n$  перехода еще называют запирающим слоем, обедненным слоем или  $i$ -областью.

Внешнее напряжение  $U$ , приложенное к  $p$ - $n$  переходу, в зависимости от полярности будет усиливать или ослаблять действие поля запирающего слоя. Если «+» внешнего источника напряжения приложить к  $p$ -области, а «-» – к  $n$ -области (прямое включение), то электрическое поле  $E_{пр}$ , создаваемое внешним источником питания, будет направлено навстречу полю запирающего слоя  $E_{зс}$  (рис.1.2). Действие запирающего слоя при этом ослабевает и его ширина уменьшается.

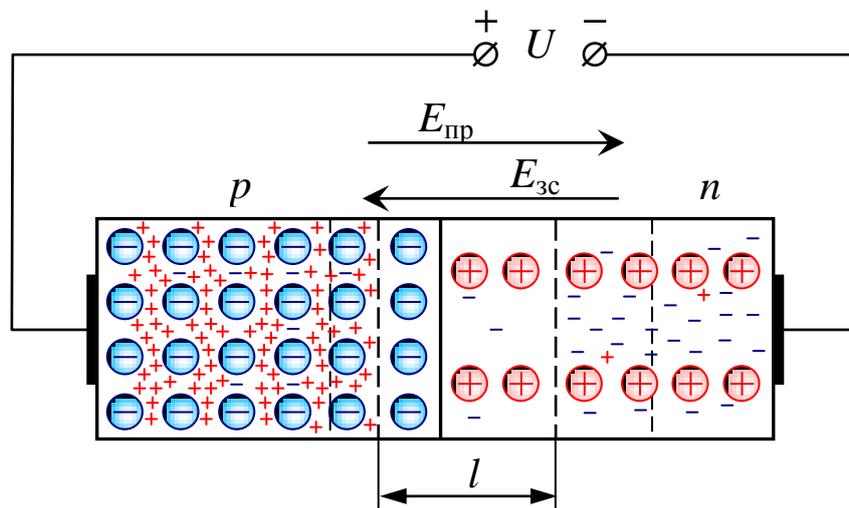


Рисунок 1.2 –  $p$ - $n$  переход, включенный в прямом направлении

При дальнейшем повышении напряжения запирающий слой исчезает вовсе. Сопротивление движению основных носителей за-

ряда снижается и через переход потечет ток, который называют *прямым*. Значение прямого тока при повышении внешнего напряжения увеличивается по экспоненциальному закону.

Введение (нагнетание) носителей заряда через электронно-дырочный переход в область полупроводника, где они являются неосновными, за счет снижения напряженности внутреннего электрического поля  $E_{зс}$ , называется *инжекцией*.

Если «+» внешнего источника напряжения приложить к  $n$ -области, а «-» – к  $p$ -области (обратное включение), то электрическое поле  $E_{обр}$ , создаваемое внешним источником питания, будет суммироваться с полем запирающего слоя  $E_{зс}$  (рис.1.3). При этом ширина запирающего слоя увеличивается, еще меньшее количество основных носителей заряда может преодолеть действие этого поля и перейти в соседнюю область.

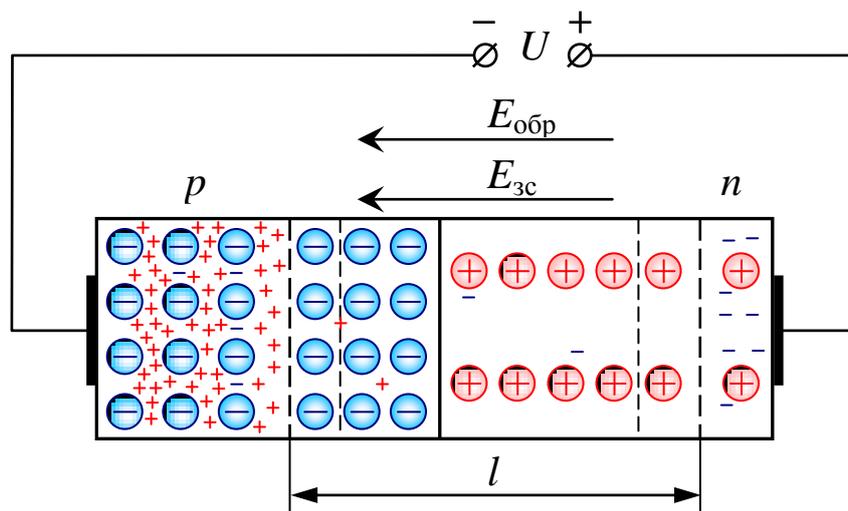


Рисунок 1.3 –  $p$ - $n$  переход, включенный в обратном направлении

Через переход протекает небольшой обратный (тепловой) ток  $I_0$ , обусловленный движением неосновных носителей. Этот ток практически не зависит от обратного напряжения, приложенного к  $p$ - $n$  переходу, но сильно зависит от температуры.

Вольт-амперная характеристика диода при прямом и обратном смещении показана на рис.1.4. Для наглядности прямая и обратная ветви вольт-амперной характеристики приведены в разных масштабах.

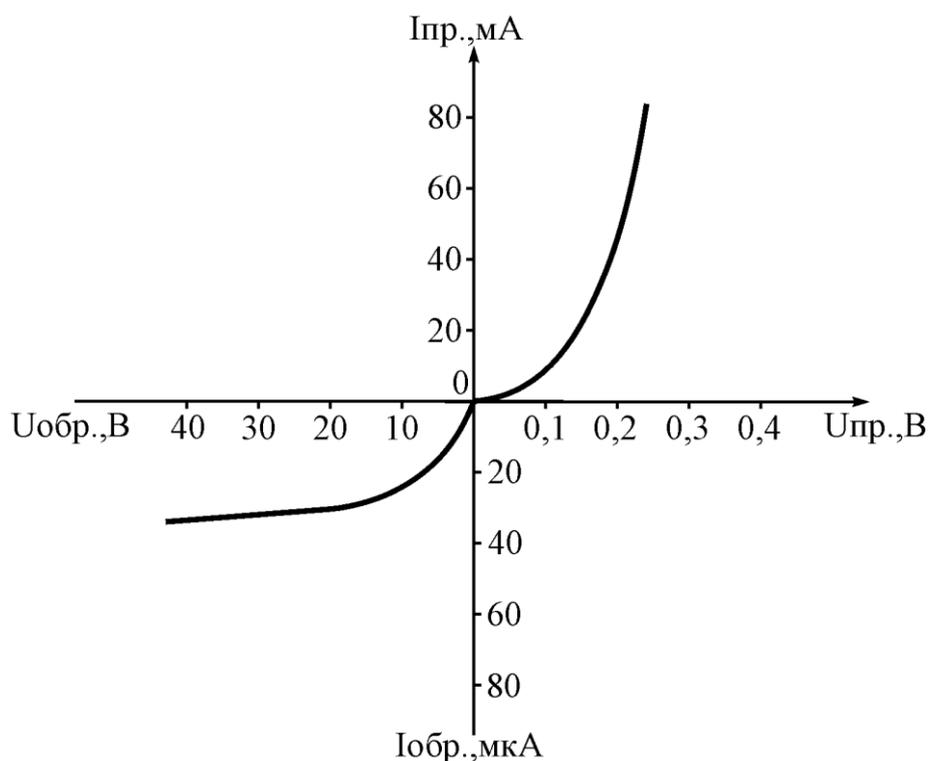


Рисунок 1.4 – Вольт-амперная характеристика выпрямительного диода

## 2. Инерционные свойства диода

При обратном смещении  $p-n$  перехода электроны и дырки находятся по обе стороны перехода, а в области самого  $p-n$  перехода их очень мало. Таким образом, при обратном включении диод обладает емкостью, величина которой пропорциональна площади  $p-n$  перехода, концентрации носителей заряда и диэлектрической проницаемости полупроводника. Эту емкость называют барьерной емкостью  $C_b$ .

При увеличении обратного напряжения барьерная емкость уменьшается вследствие уменьшения ширины запирающего слоя. При прямом включении барьерная емкость повышается, однако, здесь  $p-n$  переход кроме барьерной емкости обладает т.н. диффузной емкостью  $C_d$ , которая в данном случае играет доминирующую роль.

Диффузная емкость не оказывает существенного влияния на работу диода, т.к. она всегда зашунтирована малым прямым сопротивлением  $p-n$  перехода.

Зависимость относительного изменения емкости  $p-n$  перехода при прямом и обратном включении приведены на рис. 1.5.

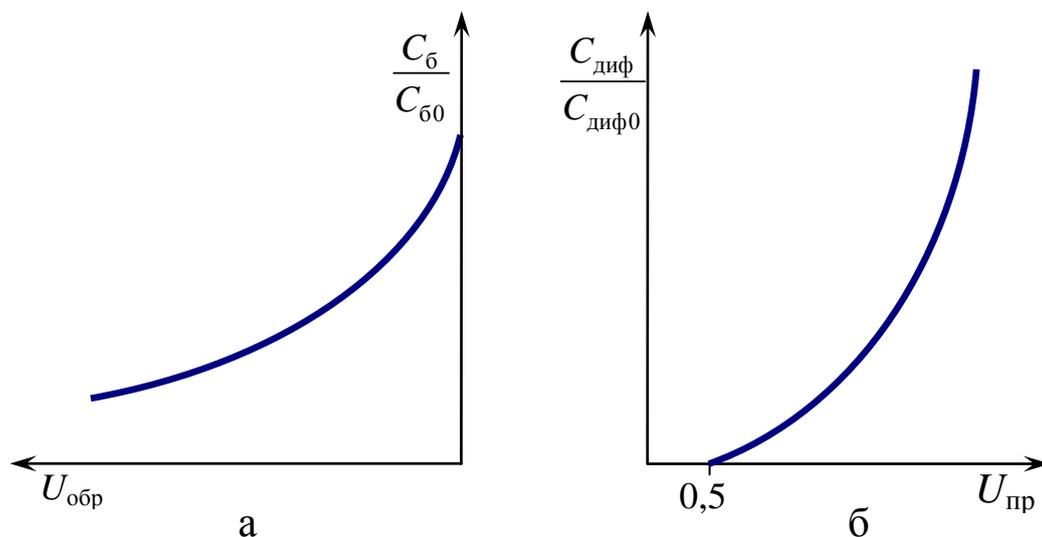


Рисунок 1.5 – Вольт-фарадная характеристика диода:  
 а – обратное включение; б – прямое включение

Современные электронные приборы работают на высокой частоте, и емкость  $p$ - $n$  перехода во многом определяет инерционные свойства полупроводниковых элементов и области их применения. Изменение тока через выпрямительный диод при изменении полярности подключенного напряжения демонстрирует рис. 1.6.

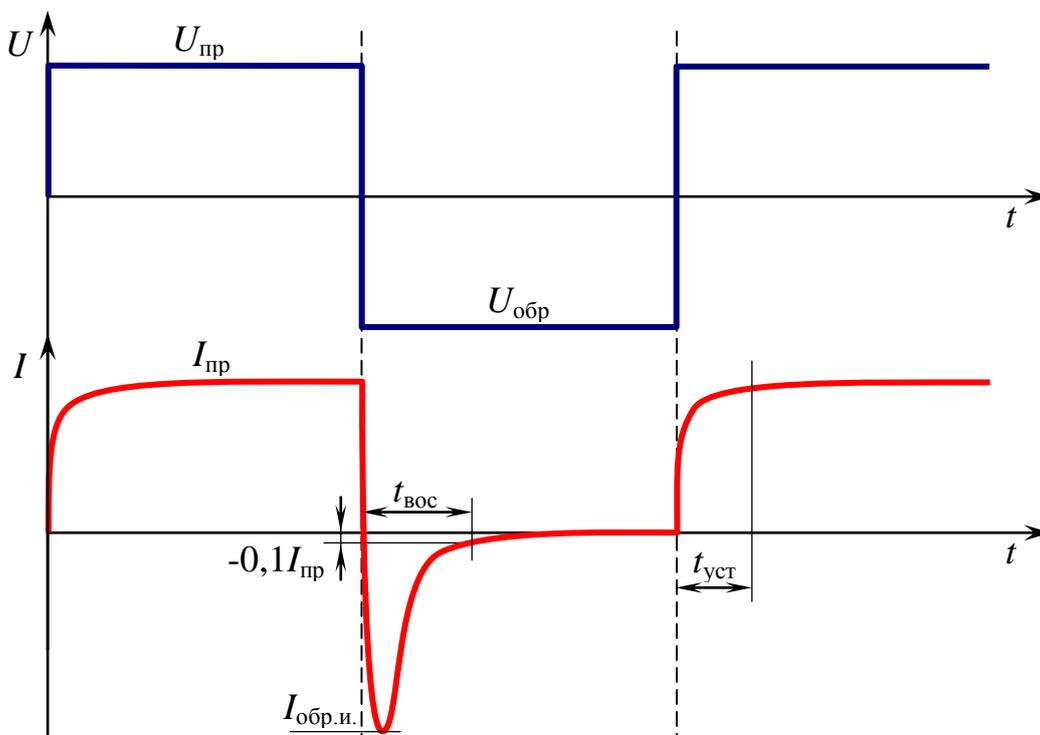


Рисунок 1.6 – Переходные процессы в  $p$ - $n$  переходе

Как видно из рисунка, форма тока, протекающего через диод, имеет некоторую инерционность, которая определяется временем установления прямого напряжения  $t_{уст}$  и временем восстановления обратного сопротивления  $t_{вос}$ . При работе на высоких частотах емкостное сопротивление  $X_C = \omega C^{-1}$  уменьшается и обратный ток через диод может возрасти на несколько порядков.

### **Порядок выполнения работы**

Перечень приборов:

- модуль для исследования характеристик полупроводниковых диодов;
- универсальный источник питания;
- комбинированный измерительный прибор – 2 шт;
- генератор импульсов FG-32;
- осциллограф GOS-620.

#### **1. Исследование характеристики диода в прямом включении**

1.1 Подготовить источник питания к работе:

- ручки регуляторов напряжения и тока 1 и 2 канала повернуть против часовой стрелки до упора;
- кнопки «СИНХРОНИЗАЦИЯ» установить в режим «НЕЗАВИСИМО»;
- включить источник питания (кнопка «POWER»);
- настроить ограничитель тока 1 канала источника питания:
  - соединить клеммы «+» и «-» 1-го канала проводником;
  - повернуть ручку «НАПРЯЖЕНИЕ» по часовой стрелке приблизительно на  $90^\circ$ ;
  - переключатель индикатора установить в положение «AMP»;
  - ручкой «ТОК» выставить ограничение тока 0,25 А;
  - снять проводник и вернуть переключатель индикатора в положение «VOLT»;
- ручкой «НАПРЯЖЕНИЕ» установить напряжение питания 3,5 В.

1.2 Собрать схему согласно рис.1.7. При этом ручка потенциометра Rд2 в исходном состоянии должна быть выкручена против часовой стрелки до упора.



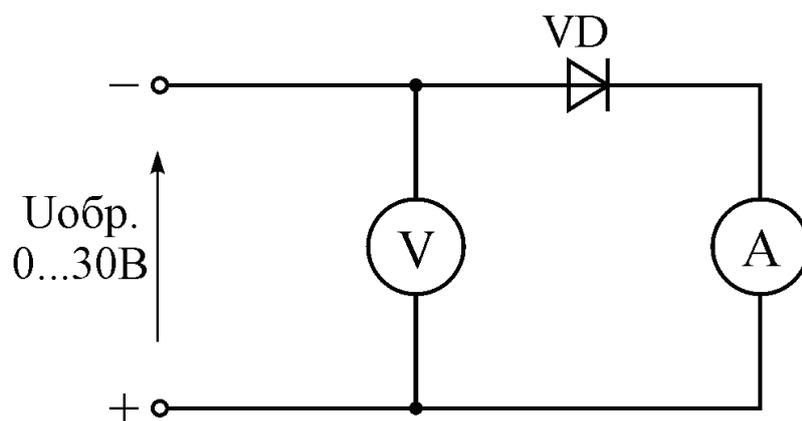


Рисунок 1.8 – Схема для получения вольт-амперной характеристики диода при обратном включении

### 3. Исследование вольт-амперной характеристики диода

- 3.1 Используя данные таблицы 1.1 и таблицы 1.2, построить вольт-амперную характеристику диода. Масштаб напряжения для обратного включения диода (третий квадрант графика) взять в 100 раз больше, а масштаб тока в 1000 раз больше, чем для прямого включения диода.
- 3.2 Для полученной ВАХ определить величину статических и динамических (дифференциальных) сопротивлений диода при прямом и обратном включении, как показано на рис.1.9

$$r_D = \frac{dU}{dI} \approx \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{m_U}{m_I} \operatorname{ctg} \beta; \quad R_{CT} = \frac{U_E}{I_E} = \frac{m_U}{m_I} \operatorname{ctg} \alpha.$$

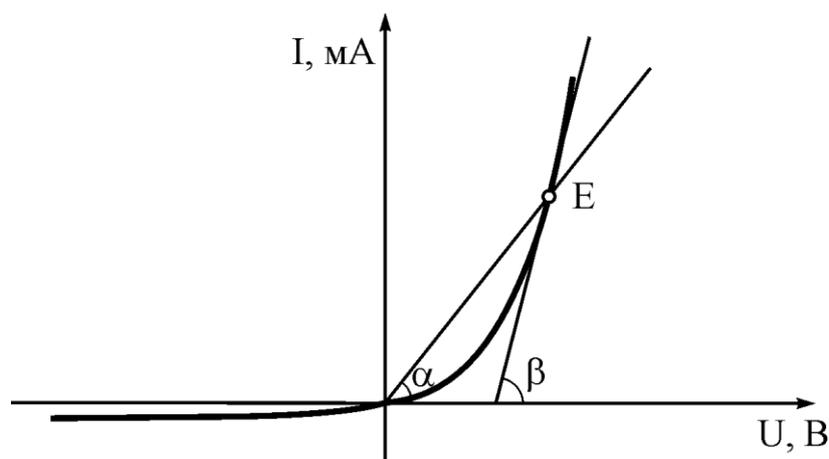


Рисунок 1.9 – Определение статического и динамического сопротивлений диода

### 3.3 Результаты расчетов занести в таблицу 1.3.

Таблица 1.3

Результаты расчетов статических и динамических сопротивлений диода.

	Прямая ВАХ	Обратная ВАХ
$r_D$		
$R_{CT}$		

## 4. Исследование переходных процессов диода

4.1 Подготовить генератор импульсов FG-32 к работе:

- при помощи ручки «FUNCTION» установить прямоугольную форму импульса;
- при помощи ручек «RANGE» и «FREQUENCY» установить частоту 120 кГц;
- установить максимальную амплитуду повернув ручку «AMPL» по часовой стрелке до упора (ручка «OFFSET» в нажатом положении для получения симметричных биполярных импульсов).

4.2 Подготовить осциллограф GOS-620 к работе, подключив оба канала согласно схемы (рис.1.10) и установив длительность развертки 0,2 мкс.

4.3 Собрать схему согласно рис.1.10.

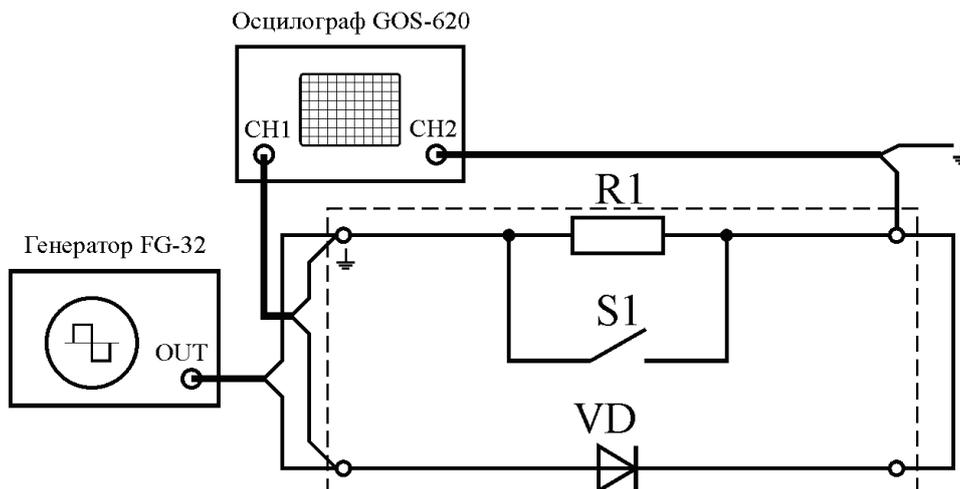


Рисунок 1.10 – Схема для исследования переходных процессов диода

4.4 При помощи ручек управления синхронизацией «TRIGGER» и смещения лучей «POSITION» осциллографа привести осцилло-

грамму к виду представленному на рис.1.11.

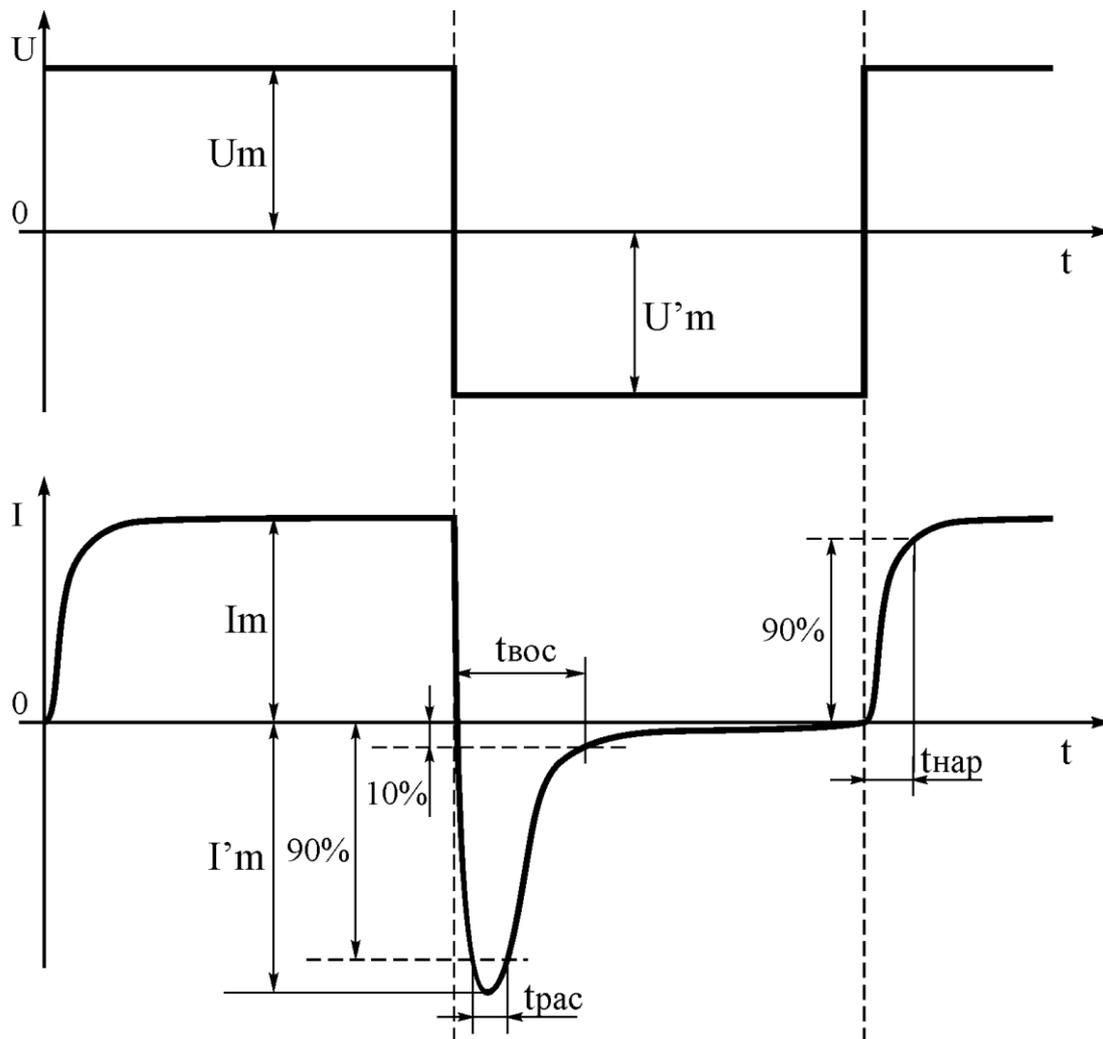


Рисунок 1.11 – Осциллограмма исследования переходных процессов диода

4.5 Нажать кнопку десятикратного увеличения по горизонтали "x10 MAG". Измерить все необходимые параметры переходного процесса согласно рис.1.11 и занести в таблицу 1.4, учитывая, что канал 2 осциллографа отображает падение напряжения на резисторе  $R1$ , зная номинал которого можно получить ток  $I$ .

Таблица 1.4

**Результаты исследования параметров переходных процессов диода**

$U_m, В$	$U'_m, В$	$I_m, мА$	$I'_m, мА$	$t_{вос}, мкс$	$t_{рас}, мкс$	$t_{нар}, мкс$

## Контрольные вопросы к работе

1. Объясните процесс образования запирающего слоя в  $p-n$  переходе.
2. Объясните возникновение тока через  $p-n$  переход при подключении диода в прямом направлении.
3. Объясните возникновение тока через  $p-n$  переход при подключении диода в обратном направлении.
4. Изобразите вольт-амперную характеристику выпрямительного диода.
5. Объясните отличие динамического сопротивления от статического. Для каких элементов эти сопротивления равны по величине?
6. Чем обусловлено наличие емкости  $p-n$  перехода?
7. Объясните, как влияет величина и направление приложенного напряжения на барьерную емкость?
8. Чем обусловлены инерционные свойства диода и как это проявляется на практике?
9. Какие электрические переходы обладают наименьшей емкостью?