

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ПО ОБЩЕЙ ФИЗИКЕ

## **№11.5 Туннелирование в полупроводниках**

выполнил студент Б04-852 группы ФЭФМ

**Яромир Водзяновский**

## Содержание

<b>1</b>	<b>Цель работы</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Теория</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Ход работы</b>	<b>4</b>
3.1	Изучение ВАХ с помощью осциллографа . . . . .	4
3.2	Изучение ВАХ статически . . . . .	5
3.3	Генератор на основе туннельного диода . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Вывод</b>	<b>8</b>

## 1 Цель работы

Исследовать принцип действия туннельного диода, измерить его ВАХ и основные параметры.

## 2 Теория

Туннелирование в полупроводниках обусловлено тем, что магнитные и электрические св-ва полупроводников можно менять в широких пределах, добавляя примеси. Эффективные массы электронов в полупроводниках меньше массы свободных электронов и туннелирование идет на более дальние расстояния.

Электроны в кристаллах движутся в периодической решетке ионов и свободное движение электрона не означает «свободу» электрона. Заряд при движении остается прежним, а соотношение между импульсом и кинетической энергией меняется.

Введение в полупроводник примесей приводит к появлению разрешенных уровней в запрещенной зоне, между которыми происходит обмен электронами. Примеси, дающие уровни вблизи нижнего края зоны проводимости, называются донорными. Для кремния или германия донорными являются элементы 5-й группы: P, As, Sb. При помещении одного из атомов Si, As только 4 из 5 электронов оказываются в решетке, 5-й остается «лишним». Уровень этого электрона находится вблизи дна зоны проводимости  $\sim -0.01$  эВ. Мы получили полупроводник n-типа.

Если в кремний ввести элементы 3-й группы: B, Al, Ga, In, то часть электронов с валентной зоны перейдет на близлежащие уровни в запрещенной зоне. Теперь у нас будет недостаток одного электрона, что и создаст дополнительные уровни. Расстояние локальных уровней от начала запрещенной зоны составляет 0.01 эВ, и возможны переходы при комнатной температуре 0.025 эВ. Мы получили полупроводник p-типа.

Сильно легированный проводник n-типа появляется целая полоса электронов на дне зоны проводимости, а у p-полупроводника образовалась полоса свободных состояний у потолка валентной зоны, таким образом, в сильно легированных полупроводниках в области узкого p-n перехода становятся возможны туннельные переходы электронов, поэтому диод так называется.

В вырожденном полупроводнике уровень Ферми для n-типа лежит в зоне проводимости, а для p-типа в валентной зоне. Расстояние от Ферми до краев зон:

$$\xi = \mu_n - E_c \quad \eta = \mu_p - E_v$$

В отсутствие внешнего поля (рис. 1а) нет тока в диоде, тк уровни  $\mu_p$  и  $\mu_n$  лежат в одной горизонтали и нет перекрытия свободных занятых состояний.

Если приложить поле (рис. 1б), то плюс к p-области, то в этом случае внешнее поле будет противоположно внутреннему в переходе. Если увеличивать внешнее поле, то смещение зон уменьшится, и часть областей перекроется и будет ток, электроны туннелируют налево.

При дальнейшем увеличении внешнего поля ток достигнет максимума (точка б на ВАХ) и начнет спадать (точка в на ВАХ), тк зона проводимости поднимается. В дальнейшем вообще пропадет ток (точка г на ВАХ), тк не будет пересечения дна зоны проводимости с валентной зоной. При напряжении  $U = (\xi + \eta)/e$  ток полностью прекращается (рис. 1г). При дальнейшем увеличении напряжения занятые уровни n-области начинают совпадать с незанятыми уровнями в зоне проводимости, аналогично и свободные уровни p-области совпадают с занятыми уровнями в валентной зоне (рис. 1д). Это называется **диффузионный ток**, уже нет туннелирования, ток резко возрастает.

При обратном напряжении (рис. 1е) уровень Ферми  $\mu_p$  смещается вверх относительно  $\mu_n$  и при этом против заселенных состояний в p-области появляются свободные уровни в n-области. Электроны p-полупроводника туннелируют в n-полупроводник, течет ток, обусловленный неосновными носителями и ток будет в обратном направлении.

Реальная ВАХ отличается от изображенной на (рис. 1ж) и выглядит следующим образом (рис. 2). Она характеризуется основными параметрами:

1.  $U_p$  соответствует максимуму тока  $I_p$ .
2.  $U_v$  соответствует минимальному току  $I_v$ .
3.  $U_f$  ( $|U_f| > U_v$ ), при которой ток равен  $I_p$ .

Наличие тока на участке между туннельной и диффузионной ветвями обуславливается:

- Образованием примесных зон из-за большой концентрации донорных центров в n-полупроводнике и акцепторных центров в p-полупроводнике. Мелкие примесные уровни могут сливаться с основными зонами. В результате переходов из примесных зон возрастает ток  $I_v$ , а  $U_v$  увеличивается до значения  $U = (\xi + \eta + E_d + E_a)/e$ ,  $E_d$  и  $E_a$  - ширина донорной и акцепторной зон.

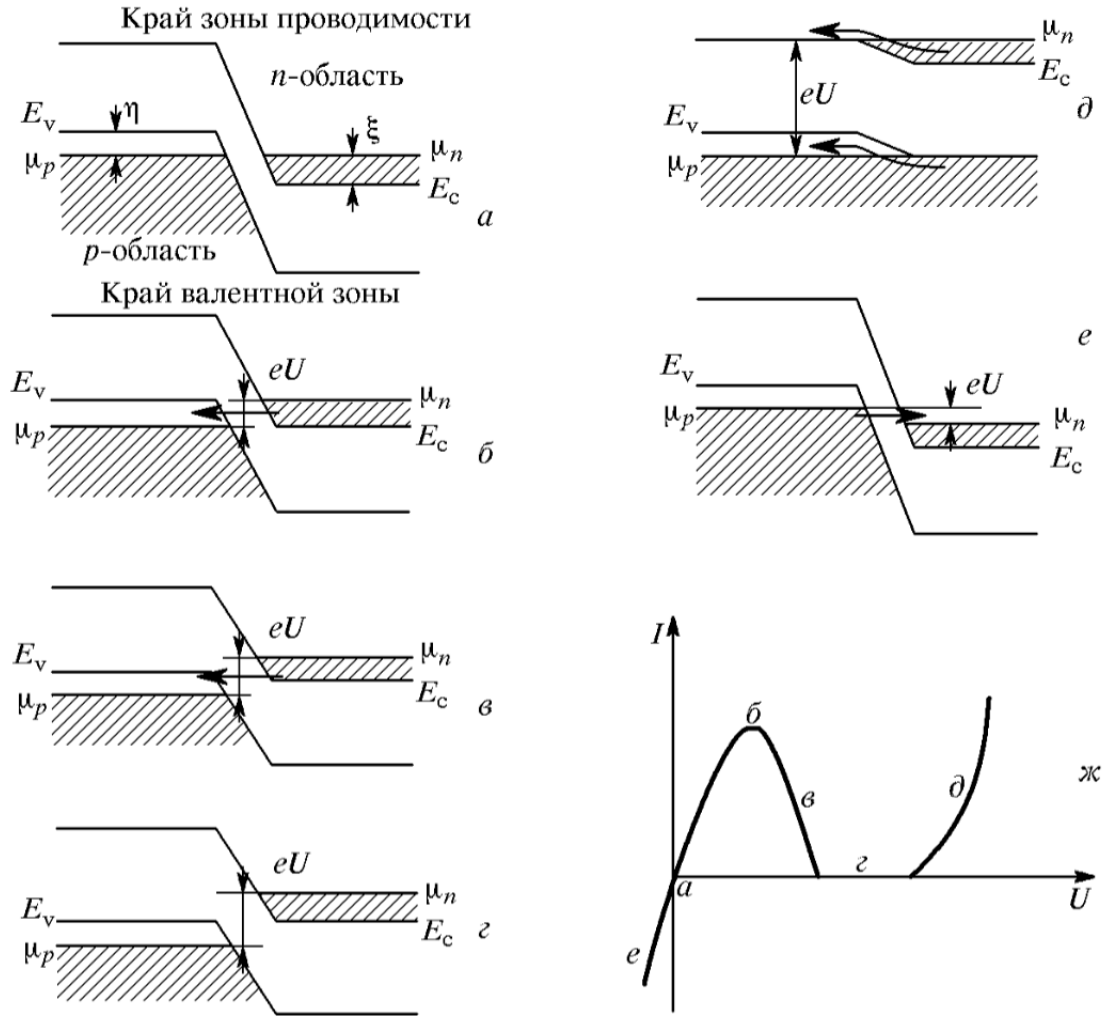


Рис. 1: Схема энергетических уровней и ВАХ идеального туннельного диода

- Вклад в ток дает увеличенная концентрация глубоких примесей, что приводит дополнительным пикам тока на ВАХ. По положению этих пиков можно оценить энергию ионизации примесей.

Мы полагали, что выше уровня Ферми нет электронов. При конечной температуре  $T$  распределение Ферми  $f(E)$  размывается на величину порядка  $2k_bT$ . Плотность энергетических состояний  $g(E)$  неодинакова в зоне: вблизи границы уровни реже. Плотность заполнения уровней:

$$n(E) = f(E)g(E) \quad (1)$$

Уровень Ферми отстоит от краев зон на  $E_F \approx \mu_n \approx \mu_p \approx k_bT$ . Если подавать прямое напряжение на переход, то зоны будут смещаться. При достижении  $U_v$  ток через диод минимален, что соответствует совпадению границ зон проводимости  $E_c$  и валентной зоны  $E_v$ . Отсюда оценим положение уровней Ферми:

$$U_v \approx \frac{\xi + \eta}{e} \quad (2)$$

Если оба полупроводника вырождены одинаково, то:

$$U_v \approx \frac{2\xi}{e} \approx \frac{2\eta}{e} \quad (3)$$

Напряжению  $U_p$  соответствует пик  $I_p$ , при котором смещение энергетических зон одинаково, точки на графиках  $n(E)$  и  $p(E)$  оказались на одной горизонтали. Так мы определим энергетический промежуток между уровнем Ферми и максимумом плотности распределения электронов  $n_{max}(E)$ :

$$U_p \approx \frac{\xi - E_{n\max}}{e} \quad (4)$$

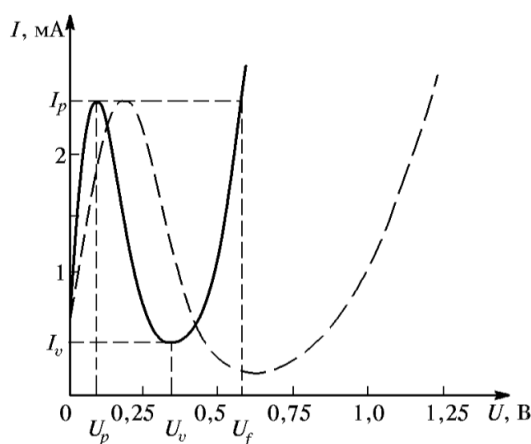


Рис. 2. Экспериментальные вольт-амперные характеристики туннельных диодов при  $T = 300\text{K}$ : сплошная линия — для диода из германия ( $\zeta \simeq \eta \simeq 7k_B T$ ,  $\Delta = 0,7\text{ эВ}$ ); штриховая — для диода из арсенида галлия ( $\zeta \simeq \eta \simeq 12k_B T$ ,  $\Delta = 1,52\text{ эВ}$ )

Рис. 2

Напряжение  $U_f$  характеризует раствор ВАХ, определяется шириной запрещенной зоны. Напряжение  $U_f$  для каждого из диодов отличается во столько раз, во сколько раз отличается ширина запрещенной зоны. На рис. 2 видно, что напряжения  $U_f$  для каждого из диодов отличается во столько раз, во сколько отличается ширина запрещенной зоны.

«Прикол» диода заключается в отрицательности дифференциального сопротивления  $dU/dI$  в интервале от  $U_p$  до  $U_v$  и диод работает как активный элемент. Его используют как микроволновый генератор.

### 3 Ход работы

#### 3.1 Изучение ВАХ с помощью осциллографа

Схема для наблюдения ВАХ на рис. 3. На вход Y подается напряжение пропорциональное току, протекающему через диод, а на вход X — падение напряжения на диоде. На одну диагональ моста подается переменное напряжение от звукового генератора через диод (исключает большие обратные токи через туннельный диод).

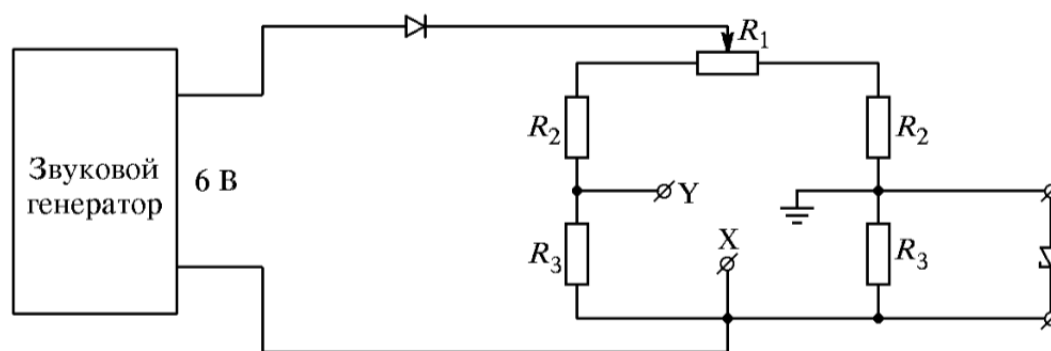


Рис. 3: Принципиальная схема наблюдения ВАХ туннельного диода с помощью осциллографа

Формула тока:

$$I_d = U_Y \frac{R_1 + 2(R_2 + R_3)}{(R_1 + R_2)R_3} \quad (5)$$

где  $R_1 = 680\ \Omega$ ,  $R_2 = 100\ \Omega$ ,  $R_3 = 120\ \Omega$

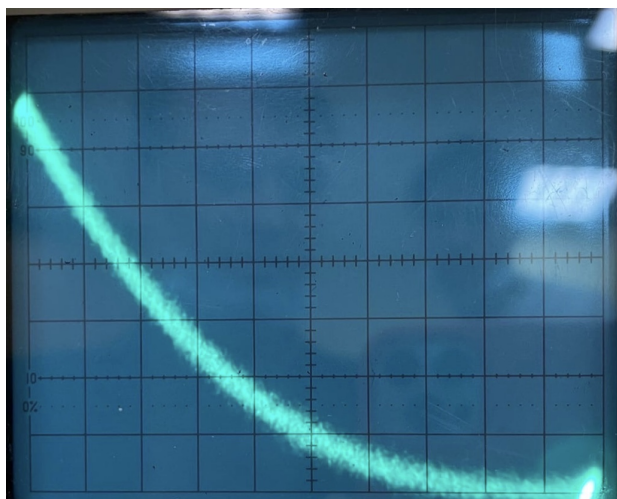


Рис. 4: ВАХ обычного полупроводникового диода.  $X = 0.5 \text{ В}$ ,  $Y = 20 \text{ мВ}$

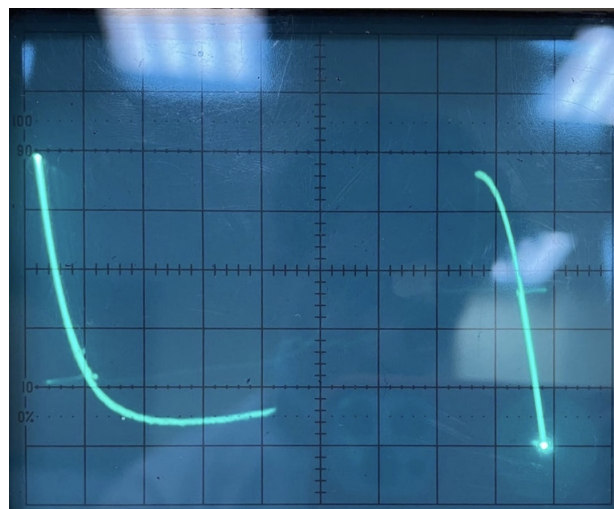


Рис. 5: ВАХ туннельного диода.  $X = 10 \text{ мВ}$ ,  $Y = 0.1 \text{ В}$

- По ВАХ рис. 5 измерим характерные значения напряжений  $U_p$ ,  $U_v$ ,  $U_f$ :

$$\begin{aligned} U_p &= 5 \cdot 10 \text{ мВ} = 0.05 \pm 0.01 \text{ В} \\ U_v &= 31 \cdot 10 \text{ мВ} = 0.31 \pm 0.01 \text{ В} \\ U_f &= 44 \cdot 10 \text{ мВ} = 0.44 \pm 0.01 \text{ В} \end{aligned}$$

- По формуле (5) определим токи:

$$\begin{aligned} I_p &= 0.53 \pm 0.11 \text{ мА} \\ I_v &= 3.29 \pm 0.11 \text{ мА} \end{aligned}$$

### 3.2 Изучение ВАХ статически

1. соберем схему на рис. 6, туннельный диод вставим в схему последним, ручка потенциометра  $R$  в минимальное положение.

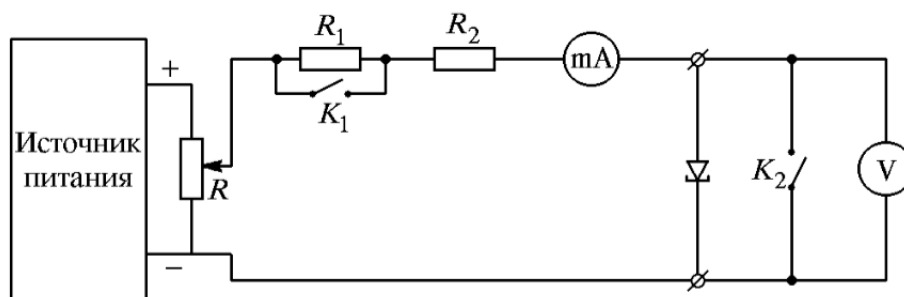


Рис. 6: Принципиальная схема измерения параметров ВАХ туннельного диода

2. Включим миллиамперметр и вольтметр.
3. Плавно повышая напряжение на диоде изменением  $R$  реостата ( $K_1$ ,  $K_2$  разомкнуты) снимем показания вольтметра и миллиамперметра.
4. Занесем данные в таблицу на рис. 7, построим ВАХ  $I(U)$  на рис. 8

I, mA	U, V	I, mA	U, V
1,900E-02	0,000E+00	3,312E+00	2,190E-02
3,600E-02	3,000E-03	3,436E+00	2,310E-02
3,930E-01	2,100E-03	3,522E+00	2,400E-02
5,720E-01	3,100E-03	3,618E+00	2,510E-02
7,580E-01	4,100E-03	3,747E+00	2,650E-02
9,480E-01	5,100E-03	3,862E+00	2,790E-02
1,052E+00	5,700E-03	4,021E+00	3,000E-02
1,180E+00	6,400E-03	4,178E+00	3,240E-02
1,300E+00	7,100E-03	2,126E+00	2,170E-01
1,399E+00	7,700E-03	6,150E-01	3,760E-01
1,548E+00	8,600E-03	6,710E-01	3,828E-01
1,710E+00	9,600E-03	7,740E-01	3,920E-01
1,862E+00	1,050E-02	9,500E-01	4,030E-01
1,929E+00	1,100E-02	1,136E+00	4,112E-01
2,053E+00	1,180E-02	1,521E+00	4,232E-01
2,160E+00	1,250E-02	1,934E+00	4,321E-01
2,277E+00	1,340E-02	2,511E+00	4,411E-01
2,448E+00	1,460E-02	4,940E+00	4,627E-01
2,575E+00	1,560E-02	6,029E+00	4,689E-01
2,709E+00	1,660E-02	4,179E+00	4,573E-01
2,849E+00	1,770E-02	2,051E+00	2,131E-01
2,970E+00	1,870E-02	2,297E+00	2,234E-01
3,089E+00	1,980E-02	3,710E+00	2,610E-02
3,206E+00	2,090E-02		

Рис. 7: Данные статического эксперимента

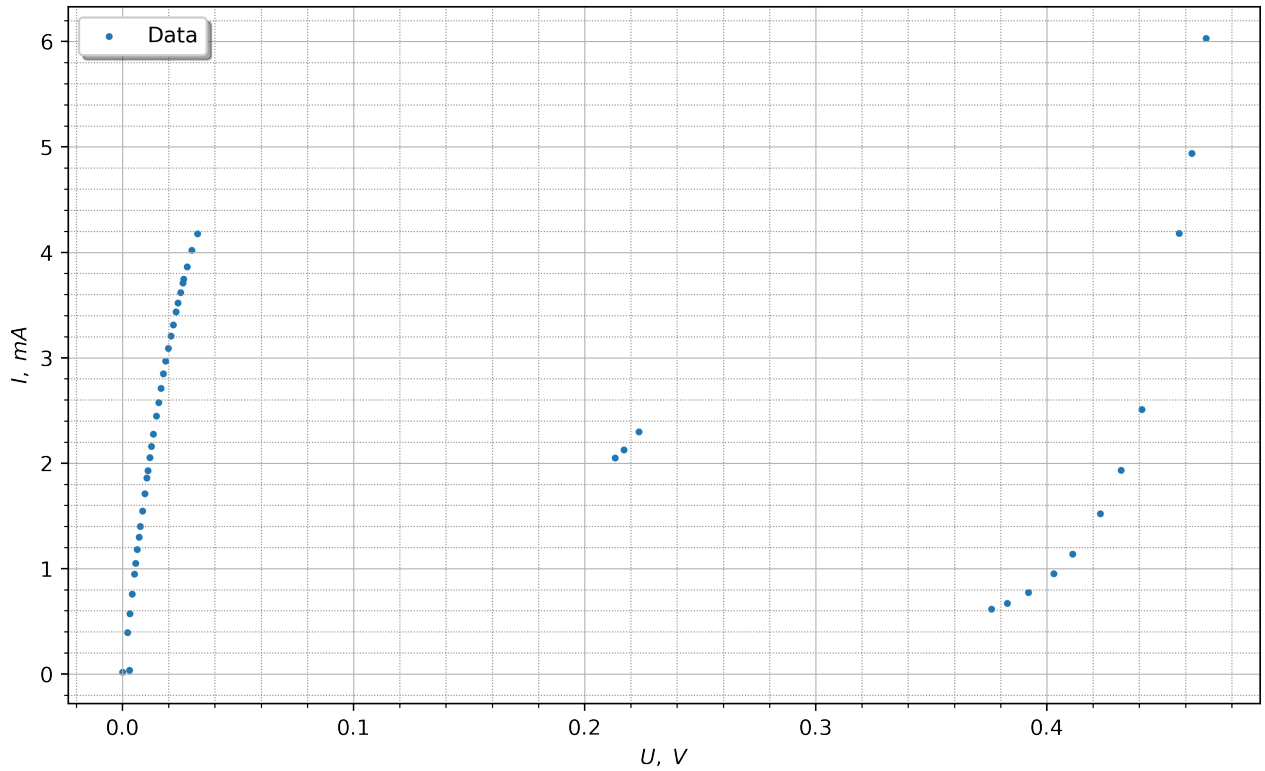


Рис. 8

5. По графику ВАХ (рис. 8) определим значения напряжений  $U_v$ ,  $U_p$ ,  $U_f$  и токов  $I_v$ ,  $I_p$ ,  $I_f$ .

$U_p = 0.032 \pm 0.001 \text{ В}$	$I_p = 4.18 \pm 0.01 \text{ мА}$
$U_v = 0.376 \pm 0.001 \text{ В}$	$I_v = 0.62 \pm 0.01 \text{ мА}$
$U_f = 0.457 \pm 0.001 \text{ В}$	$I_f = 4.18 \pm 0.01 \text{ мА}$

6. Оценим положения уровня Ферми  $\mu_n$  и максимума  $n_{max}(E)$  распределения электронов в зоне проводимости по формулам (3), (4) и полученным значениям  $U_p$ ,  $U_v$ :  $U_v$  соответствует минимуму тока, когда уровни  $E_v = E_c$  совместились, примем тогда  $E_v = 0$ , тогда из выражения (3):

$$\mu_n \approx \mu_p \approx eU_v/2 \approx 0.188 \pm 0.001 \text{ эВ}$$

Из выражения (4) получим  $E_{n \max}$ :

$$E_{n \max} = \mu_n - eU_p \approx 0.156 \pm 0.002 \text{ эВ}$$

### 3.3 Генератор на основе туннельного диода

1. Соберем схему генератора (рис. 9). Диод подключим последним в очередь.
2. Включим осциллограф и источник постоянного тока в сеть.
3. Изменяя сопротивление  $R$  перемещая рабочую точку диода на спадающий участок ВАХ получим генерацию (рис. 10)



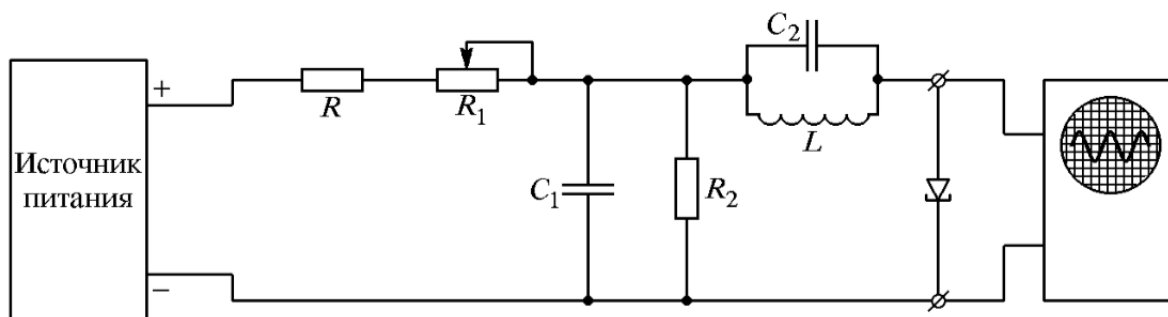
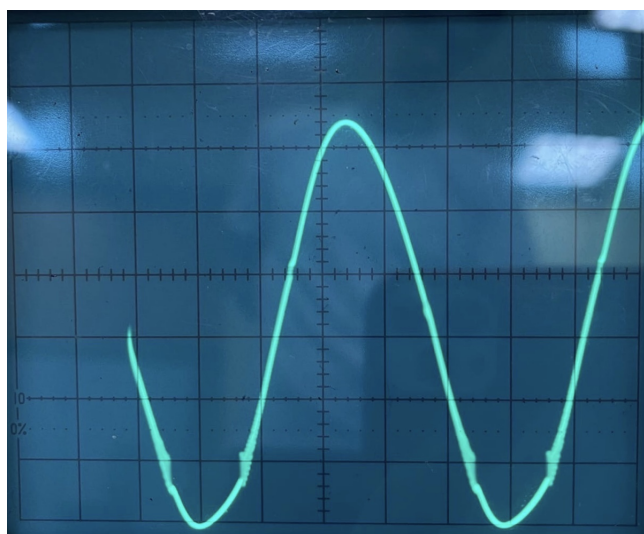


Рис. 9: Принципиальная схема генератора на туннельном диоде

Рис. 10: Генерация от туннельного диода на осциллографе.  $X = 50 \text{ мВ}$ ,  $Y = 0.1 \text{ В}$ 

## 4 Вывод

В работе исследован принцип действия туннельного диода. Наблюдали ВАХ на осциллографе, получили ее в статическом режиме, снимая зависимость тока от напряжения. Также получили основные параметры и рассчитали положение уровня Ферми.