

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерний навчально-науковий інститут

А.О. Ніконова, З.А. Ніконова, О.Ю.Небеснюк

ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ

Методичні рекомендації до лабораторних робіт
для здобувачів вищої освіти бакалавра
спеціальності «Мікро- та наносистемна техніка»
освітньо-професійної програми
«Мікро- та наносистемна техніка»

Затверджено
Вченою радою ЗНУ
Протокол № 11 від 23.06 2021

Запоріжжя

2021

УДК 621.38

НЗ77

Ніконова А.О., Ніконова З.А., Небеснюк О.Ю. Основи електроніки: методичні рекомендації до лабораторних робіт для здобувачів вищої освіти бакалавра спеціальності «Мікро- та наносистемна техніка» освітньо-професійної програми «Мікро- та наносистемна техніка»: ЗНУ, 2021. 34с.

Методичні рекомендації до лабораторних робіт розроблено для студентів денної та заочної форми навчання спеціальності «Мікро- та наносистемна техніка». Запропоновані завдання призначені для освоєння теоретичного матеріалу, опанування навичок розв'язання практичних задач, виконання самостійних завдань.

Рецензент

В.Л. Коваленко, доктор технічних наук, професор кафедри електротехніки та енергоефективності

Відповідальний за випуск

Т.В. Критська, доктор технічних наук, професор кафедри мікроелектронних та електронних інформаційних систем

Зміст

Вступ.....	4
1 Лабораторна робота №1	
Дослідження ВАХ напівпровідникового діода.....	5
2 Лабораторна робота №2	
Дослідження параметрів біполярного транзистора при різних режимах роботи.....	13
3 Лабораторна робота №3	
Дослідження сімейства вхідних та вихідних характеристик підсилювача на біполярному транзисторі.....	16
4 Лабораторна робота №4	
Фізичні основи роботи польового транзистору з керуючим р-п переходом.....	18
5 Лабораторна робота №5	
Класифікація, структура та принцип дії польових транзисторів з ізольованим затвором.....	22
6 Лабораторна робота №6	
Дослідження принципу дії та основних характеристик напівпровідникового тиристорю.....	27
ЛІТЕРАТУРА.....	34

ВСТУП

Методичні рекомендації «Основи електроніки» розроблені для здобувачів вищої освіти бакалавра спеціальності «Мікро- та наносистемна техніка» освітньо-професійної програми «Мікро- та наносистемна техніка»

Метою викладання навчальної дисципліни «Основи електроніки» є набуття знань та навичок, пов'язаних з розумінням фізичних явищ, які лежать в основі роботи електронних приладів; формування у студентів базових знань з елементної бази аналогової та цифрової схемотехніки, знайомство із фізичними принципами функціонуваннями та використанням напівпровідникових вузлів, пристроїв та типових інтегральних мікросхем в комп'ютерній електроніці.

Основними завданнями викладання дисципліни «Основи електроніки» є:

- формування у студентів базової підготовки в області електроніка та комп'ютерної схемотехніки.
- опанування будови та фізичних принципів роботи основних компонентів напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем
- освоєння методів аналізу, розрахунку та проектування типових електронних компонент, кіл та систем різноманітного призначення.

Вивчення навчальної дисципліни забезпечує набуття студентами наступних загальних та спеціальних компетентностей:

- здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями;
- здатність використовувати знання і розуміння наукових фактів, концепцій, теорій, принципів і методів для проектування та застосування мікро- та наносистемної техніки.
- здатність ідентифікувати, класифікувати, оцінювати і описувати процеси у мікро- та наносистемній техніці за допомогою побудови і аналізу їх фізичних і математичних моделей.
- здатність використовувати знання з оптичної аналогової та цифрової схемотехніки, оптоелектроніки, фотовольтаїки та геліоелектроніки.
- здатність застосовувати знання з моделювання функціональних вузлів мікроелектроніки та конструювання приладів на їх основі

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

Дослідження ВАХ напівпровідникового діода

Випрямляючий діод звичайно має структуру p⁺-n. Формування емітерної (низькоомної) області з дірковою провідністю дозволяє отримувати більш високі напруги пробою. У зв'язку з цим рекомендується виконувати розрахунки параметрів у припущенні, що діод має шматково-однорідну структуру типу p⁺-n.

Розрахунки параметрів та характеристик діода виконано для малопотужного високочастотного арсенід галієвого діоду марки АД110А.

Вихідні дані для розрахунків: геометрія кристалу - паралелепіпед з квадратною основою $A=1$ см, товщина пластини $h = 300$ мкм;

- товщина бази $\omega_b=280$ мкм;
- концентрація $N_b=10^{14}$ см⁻³ домішкових атомів у вихідному кристалі;
- концентрація домішкових атомів у емітерній області $N_e=10^{18}$ см⁻³;
- час життя нерівноважних носіїв $\tau_0 = 10$ нс;
- рухливість дірок $\mu_p = 1200$ см²/В·с;
- рухливість електронів $\mu_n = 800$ см²/В·с;
- постійна Больцмана $k=1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;
- кімнатна температура $T_w=300$ К;
- заряд електрона $q=1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл;
- діелектрична постійна $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
- питомий опір бази діода $\rho_b = 6,5$ Ом·см
- тепловий опір корпусу діода $R_T = 1,5$ К/Вт
- площа перетину $A=0,158$ мм²;
- концентрація власних носіїв у напівпровіднику $n_i=1,4 \cdot 10^{10}$ см⁻³;
- зворотна напруга $U_{зв}=50$ В;
- максимальна зворотна напруга $U_{зв(max)}=50$ В;
- зворотний струм діода $0,005$ мА;
- градієнт концентрації $a=3,5 \cdot 10^{19}$ см⁻³

Модель малопотужного ВЧ діода

Найпоширеніша в теорії електричних кіл модель напівпровідникового діода, що досить повно враховує особливості його нелінійної вольт-амперної характеристики, — модернізована модель Еберса-Молла (рис. 1.1). Ця модель містить бар'єрну й дифузійну ємності діода ($C_{бд}$, $C_{дд}$), струм p-n-переходу (I_{p-n}), опір бази діода (R_b) і опір витоку (R_v).

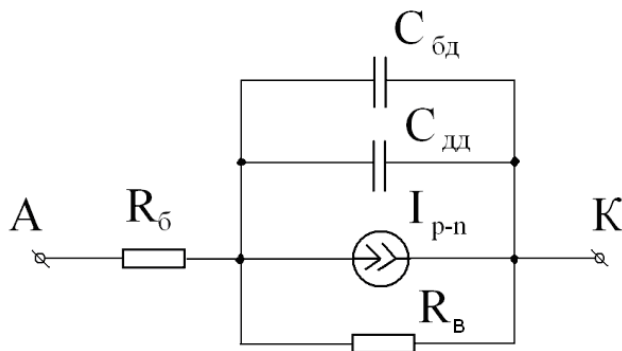


Рисунок 1.1 - Модель Еберса-Молла напівпровідникового діода

Тепловий потенціал φ_T , В:

$$\varphi_T = kT/q = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 / 1,6 \cdot 10^{-19} = 0,026,$$

де k - постійна Больцмана;

T - абсолютна температура в Кельвінах;

q - заряд електрона.

Коефіцієнт дифузії дірок у базі $D_{p\delta}$, cm^2/s :

$$D_{p\delta} = \mu_p \cdot \varphi_T = 1200 \cdot 0,026 = 31,2,$$

де $\mu_p = 1200$ ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$) – рухливість дірок

Тепловий струм діода $I_{\text{до}}$, А :

$$I_{\text{до}} = \frac{qn_i^2 S_{p-n} D_{p\delta}}{\omega_{\delta} N_{\delta}} = \frac{qn_i^2 (A^2) D_{p\delta}}{\omega_{\delta} N_{\delta}} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (1,4 \cdot 10^{10})^2 \cdot (0,158)^2 \cdot 31,2}{2,8 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{14}} = 8,7 \cdot 10^{-10},$$

де n_i — концентрація власних носіїв у напівпровіднику;

S_{p-n} — площа р-п переходу,

A - площа перетину напівпровідника.

Контактна різниця потенціалів φ_k , В:

$$\varphi_k = \varphi_T \ln\left(\frac{N_a N_{\delta}}{n_i^2}\right) = 0,026 \ln\left(\frac{10^{18} \cdot 1 \cdot 10^{14}}{(1,4 \cdot 10^{10})^2}\right) = 0,701.$$

Бар'єрна ємність діода $C_{\delta 0}$, Ф:

$$C_{\delta 0} = S_{p-n} \sqrt{\frac{q\epsilon\epsilon_0 N_{\delta}}{2\varphi_k}} = 0,4 \sqrt{\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 1 \cdot 10^{14}}{2 \cdot 0,701}} \\ = 1,39 \cdot 10^{-9}.$$

Опір бази діода R_{δ} , Ом:

$$R_{\delta} = \rho_{\delta} \frac{\omega_{\delta 0}}{S_{p-n}} = \frac{1}{q\mu_n N_{\delta}} \cdot \frac{\omega_{\delta 0}}{S_{p-n}} = 6,5 \cdot \frac{2,8 \cdot 10^{-2}}{0,4} = 0,455,$$

де ρ_{δ} — питомий опір бази діода.

Напруга лавинного пробоя U_l , В:

$$U_l = 60 \cdot \rho_{\delta}^{0,64} = 60 \cdot 6,5^{0,64} = 519,8 .$$

Товщина збідненого шару l , см:

$$l = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(\varphi_k + U_{зв})(N_e + N_{\delta})}{N_e N_{\delta} q}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} (0,701 + 50)(10^{18} + 1 \cdot 10^{14})}{1 \cdot 10^{14} \cdot 10^{18} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}} = 0,673 \cdot 10^{-5}.$$

Генераційний струм переходу I_r , А:

$$I_r = \frac{q l S_{p-n} n_i}{2\tau_{\delta}} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,673 \cdot 10^{-5} \cdot 1,4 \cdot 10^{10}}{2 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = 7,5 \cdot 10^{-10} .$$

Дифузійна довжина нерівноважних носіїв L_{δ} , см:

$$L_{\delta} = \sqrt{D_{p\delta} \cdot \tau} = \sqrt{3,12 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = 1,77 \cdot 10^{-2} .$$

Ширина ОПЗ при U_{\max} і при нульовому U_0 : (розрахунок виконано в програмі Pascal-OPZ):

$$\delta(U) = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot \epsilon\epsilon_0 \cdot (\varphi_k - U)}{q \cdot a}} ;$$

$$\delta(-U_{\max}) = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot 12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (0,701 + 50)}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3,5 \cdot 10^{19}}} = \sqrt[3]{1,138 \cdot 10^{-8}} = 0,106 \cdot 10^{-2} (M);$$

$$\delta(0) = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot 12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,701}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 3,5 \cdot 10^{19}}} = \sqrt[3]{159,5 \cdot 10^{-12}} = 12,6 \cdot 10^{-4} (M).$$

Program OPZ;

Var S:real;

Begin

S:=exp(1/3*ln(1.138*(1/(sqr(10))*sqr(10*sqr(10)))));

Writeln ('S:=' ,S);

Readln;

End.

Загальна щільність струму , A/мм²:

$$j = \frac{I}{A} = \frac{0,01}{0,158} = 0,063.$$

За формулою (1.1), що описує ВАХ діода, за допомогою програми Pascal, змінюючи напругу на діоді з кроком у 0,1В, визначено струм. Отримані дані занесено до таблиці (3.1) і побудовано пряму гілку ВАХ діода (рис.1.2):

$$I = I_0 \left(\exp \frac{qU}{kT} - 1 \right) . \quad (1.1)$$

Таким же чином розраховується зворотний струм діода, змінюючи напругу з кроком у 10 В. Дані занесено до таблиці 3.2. Побудовано зворотну гілку ВАХ діода (рис 3.5).

Програму для розрахунку залежності I(U) подано нижче.

Program VAX;


```

Var T: integer;
I,I0,q,U,k: real;
Begin
Readln (T,I0,q,U,k);
I:=I0*(exp((q*U)/(k*T)-1));
Writeln ('I:=',I);
Readln;
End.

```

Таблиця 1.1- Залежність U(I) (пряма гілка)

U,В	I·10⁻⁶, А
0	0
0,1	0,3
0,2	1,3
0,3	3,1
0,4	10,3
0,5	14,9
0,6	22,2
0,7	35,1
0,8	41,89
0,9	50,1
1	59,03
1,1	64,06
1,2	72,04
1,3	80,02

1,4	91,01
-----	-------

Таблиця 1.2- Залежність $U_{зв}(I)$ (зворотна гілка)

U,В	I·10⁻⁶,А
-50	-4,9
-45	-4,88
-40	-4,87
-35	-4,87
-30	-4,87
-25	-4,7
-20	-4,6
-15	-4,11
-10	-2,83
-5	-1,31
0	0

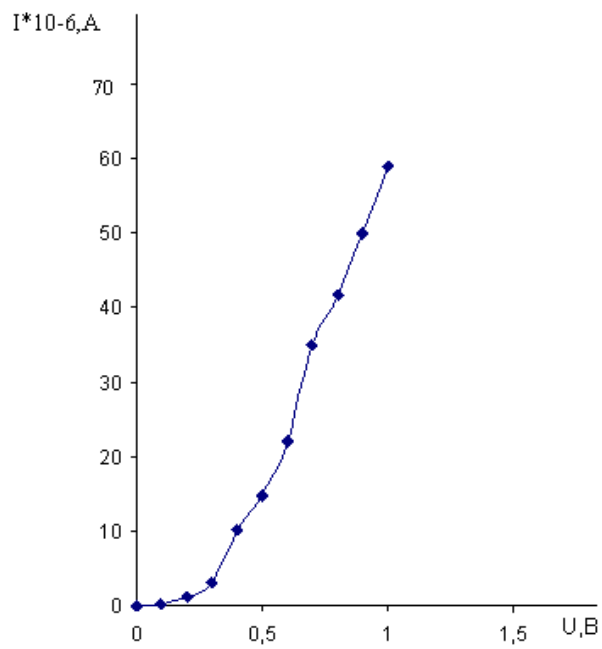


Рисунок 1.2 - Графік прямої гілки ВАХ діода

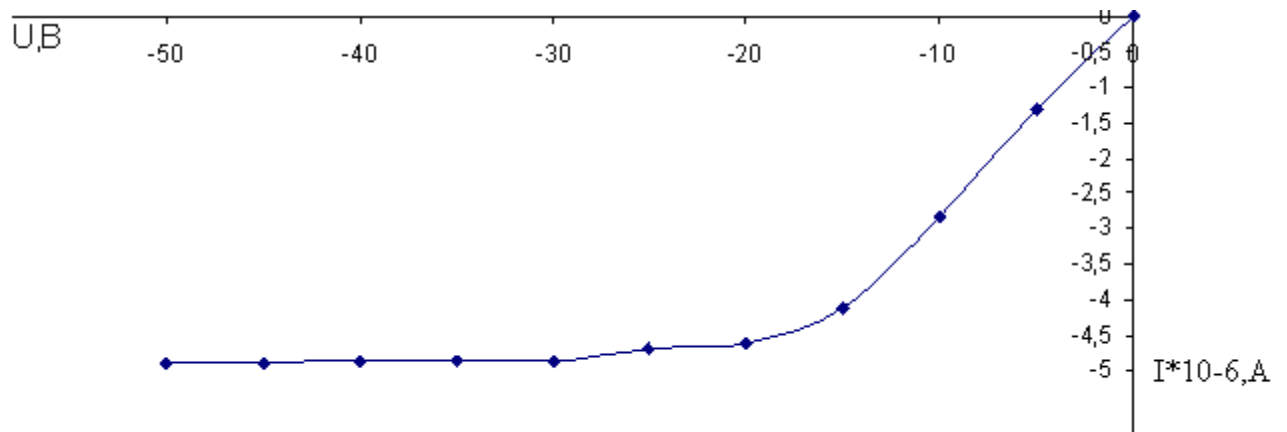


Рисунок 1.3- Графік зворотної гілки ВАХ діода

Для дослідження та побудови характеристик необхідно провести моделювання в програмному середовищі Electronic Workbench

Дослідження прямої гілки ВАХ діод може бути проведено за допомогою схеми рис.3.9. Вона складається з джерела струму I , міліамперметра A , діода VD і вольтметра V для вимірювання напруги на діоді.

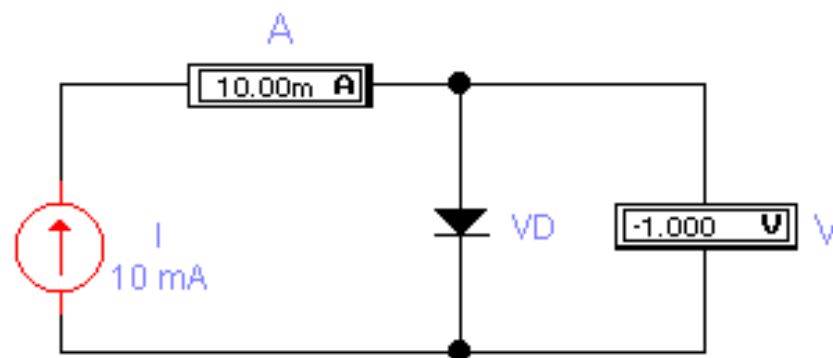


Рисунок 1.4 – Дослідження прямої гілки ВАХ діода

ВАХ можна побудувати після вимірювання значень напруги та струму. Для наочного зображення ВАХ можна використовувати схему на рис. 1.5.

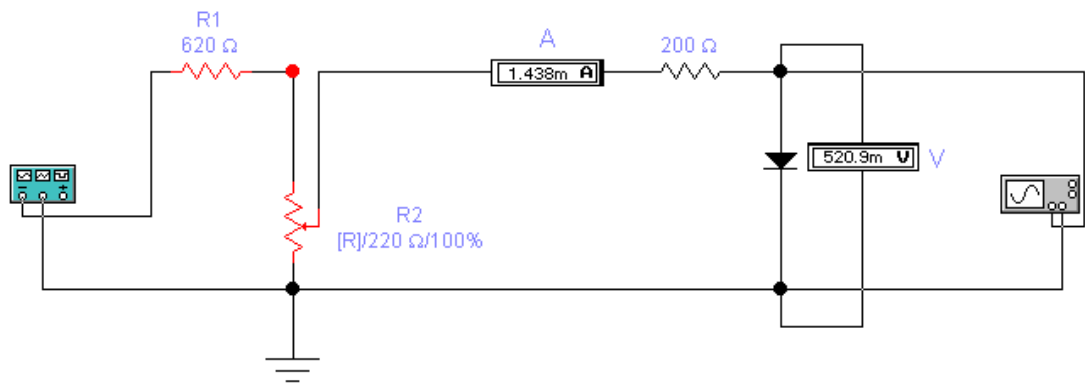


Рисунок 1.5 – Схема для визначення прямої гілки ВАХ

Для дослідження зворотної гілки ВАХ діода використовується схема на рис. 1.6. В ній замість джерела струму використовується U_i із запобіжним резистором R_z для обмеження струму через діод у разі його пробію.

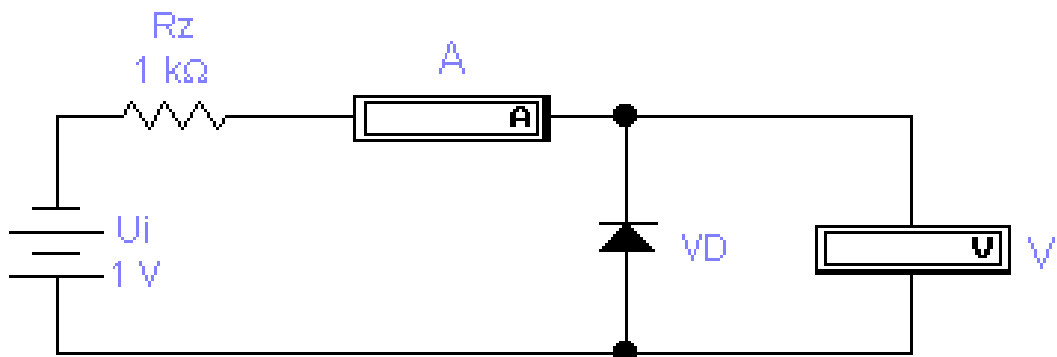


Рисунок 1.6 – Дослідження зворотної гілки ВАХ діода
Після вимірювання значень напруги та струму будується ВАХ. Для наочного зображення ВАХ можна використовувати схему на рис. 1.7

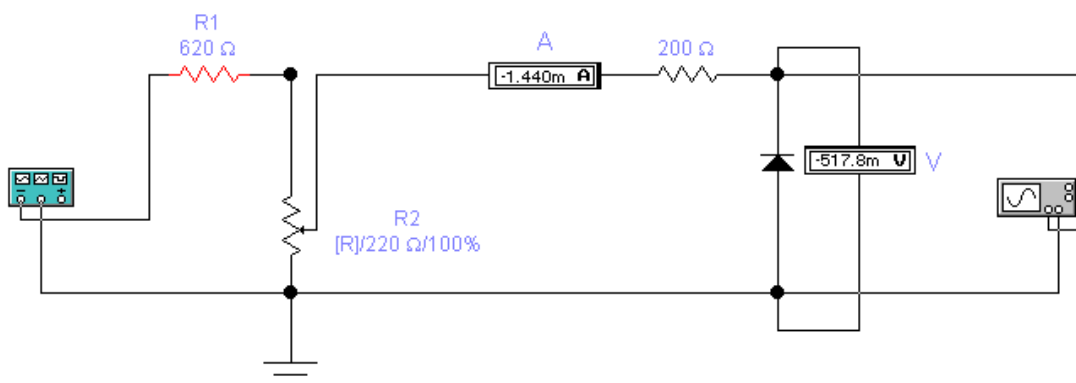


Рисунок 3.11 – Схема для визначення зворотної гілки ВАХ

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

*Дослідження параметрів біполярного транзистора
при різних режимах роботи*

Для розрахунку параметрів та характеристик було обрано біполярний транзистор АТ109В.

Вихідні дані для розрахунку:

Заряд електрона, $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл;

Власна концентрація, $n_i = 9,6 \cdot 10^6$ см⁻³;

Концентрація домішкових атомів області бази, $N_b = 10^{13}$ см⁻³;

Кімнатна температура, $T_w = 300$ К;

Концентрація домішкових атомів області колектора, $N_k = 10^{16}$ см⁻³;

Концентрація домішкових атомів області емітера, $N_e = 2 \cdot 10^{17}$ см⁻³;

Рухливість зарядів колектора, $\mu_k = 1200$ см²/Вс;

Рухливість зарядів емітера, $\mu_e = 800$ см²/Вс;

Постійна Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К

Розрахунок параметрів біполярного транзистора

Розраховуємо потенціал транзистора:

$$\varphi_T = \frac{k \cdot T}{q},$$

$$\varphi_T = \frac{k \cdot T}{q} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 0,026 \text{ В}.$$

Потенціал колектора – емітера ($\varphi_{ке}$) визначається за формулою:

$$\varphi_{\hat{e}e} = \varphi_T \frac{N_{\hat{a}} * N_e}{n_i^2},$$

$$\varphi_{\hat{e}e} = \varphi_T \ln\left(\frac{N_{\hat{a}} N_e}{n_i^2}\right) = 0,026 \ln\left(\frac{10^{13} * 2 * 10^{17}}{(9,6 * 10^6)^2}\right) = 1,15 \hat{A}.$$

Розраховуємо потенціал колектора за формулою:

$$\varphi_{\hat{e}\hat{e}} = \varphi_T \frac{N_{\hat{a}} * N_{\hat{e}}}{n_i^2},$$

$$\varphi_{\hat{e}\hat{e}} = \varphi_T \ln\left(\frac{N_{\hat{a}} N_{\hat{e}}}{n_i^2}\right) = 0,026 \ln\left(\frac{10^{14} * 10^{16}}{(9,6 * 10^6)^2}\right) = 1,17 \hat{A}.$$

Визначаємо:

- коефіцієнт дифузії емітера:

$$D_e = \varphi_{\hat{e}e} * \mu_e,$$

$$D_e = \varphi_{Ke} \cdot \mu_e = 1.15 \cdot 800 = 920 \text{ см}^2/\text{с}$$

- коефіцієнт дифузії колектора:

$$D_{\hat{e}} = \varphi_{\hat{e}\hat{e}} * \mu_{\hat{e}},$$

$$D_{\hat{e}} = \varphi_{K\hat{K}} \cdot \mu_{\hat{e}} = 1.17 \cdot 1200 = 1404 \text{ см}^2/\text{с}$$

Розраховуємо:

- генераційний струм переходу емітера:

$$I_{Oe} = \frac{q * n_e^2 * S_e * D_e}{h_e * N_e};$$

де: S_e – площа емітера;

D_e – коефіцієнт дифузії емітера;

h_e – параметри емітера;

$$I_{\hat{I}e} = \frac{qn_i^2 S_e D_e}{h_e N_e} = \frac{1,6 * 10^{-19} * (9,6 * 10^6)^2 * 0,04 * 920}{10^1 * 10^{17}} = 5,42 * 10^{-19} \text{ \AA};$$

- генераційний струм переходу колектора:

$$I_{Ok} = \frac{q * n_i^2 * S_K * D_K}{h_K * N_K};$$

де: S_K – площа колектора;

D_K – коефіцієнт дифузії колектора;

h_K – параметри колектора;

$$I_{i\hat{E}} = \frac{qn_i^2 S_{\hat{E}} D_{\hat{E}}}{h_K N_K} = \frac{1,6 * 10^{-19} * (9,6 * 10^6)^2 * 0,03 * 1404}{10^2 * 10^{16}} = 6,36 * 10^{-19} \text{ \AA}$$

;

- бар'єрні ємності переходів при нульовому зсуві для емітера та колектора:

$$C_{\hat{a}e0} = S_e \sqrt{\frac{q\epsilon\epsilon_0 N_e}{2\varphi_{\hat{E}e}}} = 0,04 \sqrt{\frac{1,6 * 10^{-19} * 12 * 8,85 * 10^{-14} * 2 * 10^{17}}{2 * 1,15}} = 4,86 * 10^{-9} \text{ \AA};$$

$$C_{\hat{a}\hat{E}0} = S_k \sqrt{\frac{q\epsilon\epsilon_0 N_{\hat{E}}}{2\varphi_{\hat{E}\hat{E}}}} = 0,03 \sqrt{\frac{1,6 * 10^{-19} * 12 * 8,85 * 10^{-14} * 10^{16}}{2 * 1,17}} = 2,55 * 10^{-9} \text{ \AA}.$$

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

Дослідження сімейства вхідних та вихідних характеристик підсилювача на біполярному транзисторі

Для побудови вхідних і вихідних залежностей біполярного транзистора можна використати дані з лабораторної роботи, в якій досліджували статичні характеристики біполярного транзистора в схемі увімкнення із загальною базою.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для побудови вихідних характеристик БТ

$U_{бк}, В$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_{к1}, мА$	0,1	0,25	0,7	1,3	1,7	2,2	2,6	3	3,5	3,9	4,2
$I_{к2}, мА$	0,1	2	4,9	6,3	7,6	7,8	8	8,2	8,6	9	9,4
$I_{к3}, мА$	0,1	1,5	4,1	5,7	6,5	7	7,4	7,6	8	8,3	8,7

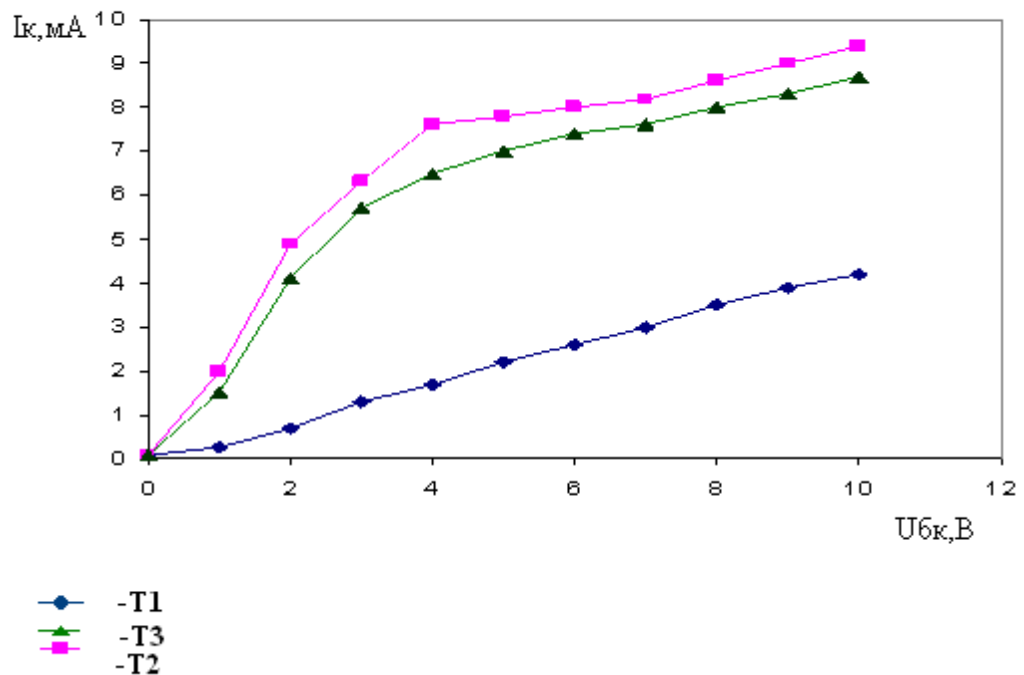


Рисунок 3.1 – Вихідні характеристики БТ

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для побудови вхідних характеристик БТ

$U_{eб}, В$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_{e1}, мА$	0,1	0,1	0,24	0,5	0,8	1,2	1,5	1,7	2	2,6	3,5
$I_{e2}, мА$	10	13,5	15,1	17	20,1	24,8	29,1	32,8	38,4	47,3	62,4
$I_{e3}, мА$	3	6,2	7	8,2	9,25	13,2	15,6	23,9	30,5	40,1	55,1

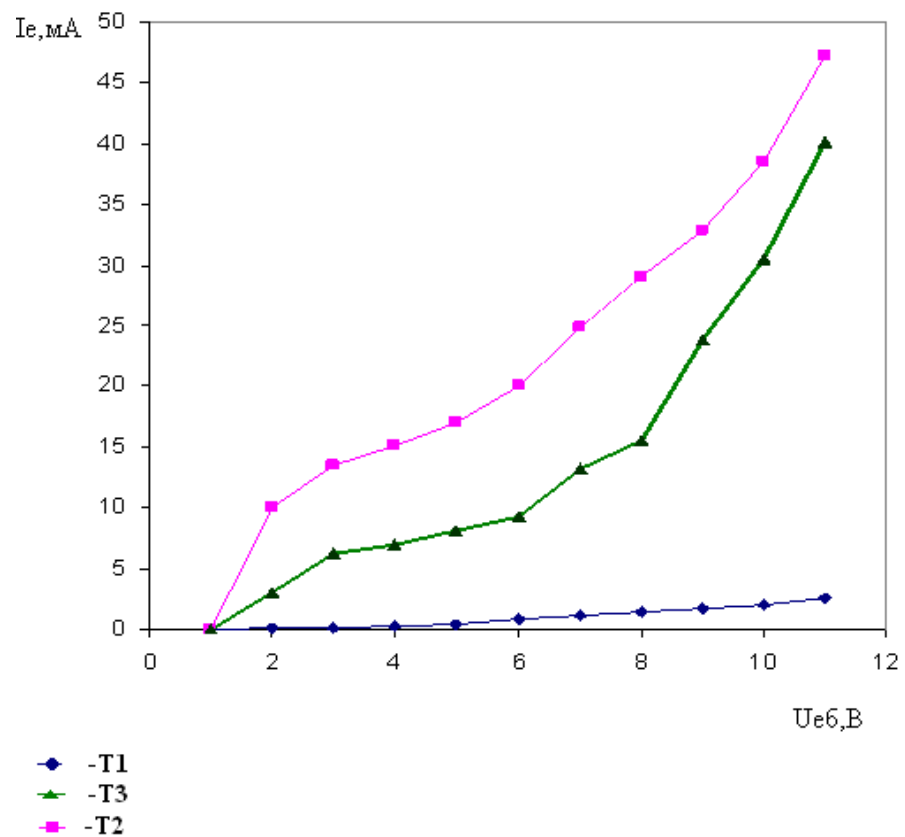


Рисунок 3.2 – Вхідні характеристики БТ

Для дослідження та побудови характеристик рекомендується провести моделювання в програмному середовищі Electronic Workbench.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4
Фізичні основи роботи польового транзистору
з керуючим р-п переходом

Для розрахунку було обрано польовий транзистор марки КП302В.

Вихідні дані:

- Концентрація домішки, $N=1,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$
- Рухливість електронів, $\mu_n=1500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$
- Заряд електрона, $e=1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
- Діелектрична проникність, $\epsilon=11,8 \text{ Ф/м}$
- Діелектрична постійна, $\epsilon=8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
- Постійна Больцмана, $k=8,62 \cdot 10^{-5} \text{ еВ}$
- Час переходу, $t_{\text{пер}}=0,8 \text{ нс}$
- Напруга на затворі, $U_3=39 \text{ В}$
- Напруга на стоці $U_c=20 \text{ В}$
- Розміри напівпровідникового транзистора:
 Товщина, $W=23 \text{ мкм}$
 Довжина, $l=12 \text{ мкм}$
 Ширина, $d=3 \text{ мкм}$

Використовуючи програму Excel, розраховуються такі параметри транзистора:

Опір каналу:

$$R_k = 1 / (e \mu_n W d N)$$

$$R_k = 1 / (1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1500 \cdot 23 \cdot 3 \cdot 1,5 \cdot 10^{16}) = 4,83 \cdot 10^2 \text{ (Ом)}$$

Питомий опір:

$$\rho = e n \mu_n$$

$$\rho = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,5 \cdot 10^{22} \cdot 1500 = 3,6 \text{ (Ом} \cdot \text{см)}$$

Напруга відсічки:

$$U_{\text{відс}} = W^2 / (\epsilon \rho \mu_n l)$$

$$U_{\text{відс}} = 529 \cdot 10^{-6} / (8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3,6 \cdot 1500 \cdot 12 \cdot 10^{-6}) = 85,4 \text{ (В)}$$

Гранична частота:

$$f_{\text{Гр}} = 1 / (2\pi t_{\text{пер}})$$

$$f_{\text{Гр}} = 1 / (2 \cdot 3,14 \cdot 0,8 \cdot 10^{-6}) = 2,01 \cdot 10^5 \text{ (Гц)}$$

Струм стоку:

$$I_c = (1/R) \cdot (U_c + ((U_c^{2/3} + U_3^{2/3}) / U_{\text{відс}}))$$

$$\begin{aligned} I_c &= (1/4,83 \cdot 10^2) \cdot (20 + ((20^{2/3} + 39^{2/3}) / 85,4)) = \\ &= (1/4,83 \cdot 10^2) \cdot (20 + ((7,37 + 11,5) / 85,4)) = 4,25 \text{ (А)} \end{aligned}$$

Крутизна характеристики:

$$S = (1/R) \cdot ((1/3 \cdot U_{\text{отс}}) - U_3 (1 - 2/3 \sqrt{U_3 / U_{\text{відс}}}))$$

$$S = (1/4,83 \cdot 10^2) \cdot ((1/3 \cdot 85,4) - 39 (1 - 2/3 \sqrt{39/85,4})) = 6,71 \cdot 10^{-4} \text{ (А/В)}$$

На основі експериментальних даних, що отримані у лабораторній роботі №8 «Дослідження характеристик польового транзистора з керуючим р-п переходом» [12], будується графік залежності струму стоку ($I_c, \text{А}$) від напруги витік – стік ($U_{\text{вс}}, \text{В}$):

Таблиця 4.1 - Дані для побудови залежності струму стоку від напруги витік - стік

U_{вс}, В	0,1	2	4	6	8	10	12	14	16
I_{c1}, мА	0,02	0,03	0,08	0,09	0,12	0,14	0,14	0,15	0,16
I_{c2}, мА	0,01	0,03	0,04	0,06	0,08	0,11	0,13	0,15	0,17
I_{c3}, мА	0,01	0,02	0,03	0,05	0,06	0,09	0,12	0,14	0,16
I_{c4}, мА	0,02	0,03	0,07	0,09	0,12	0,15	0,19	0,21	0,23
I_{c5}, мА	0,01	0,03	0,05	0,06	0,08	0,12	0,15	0,17	0,22

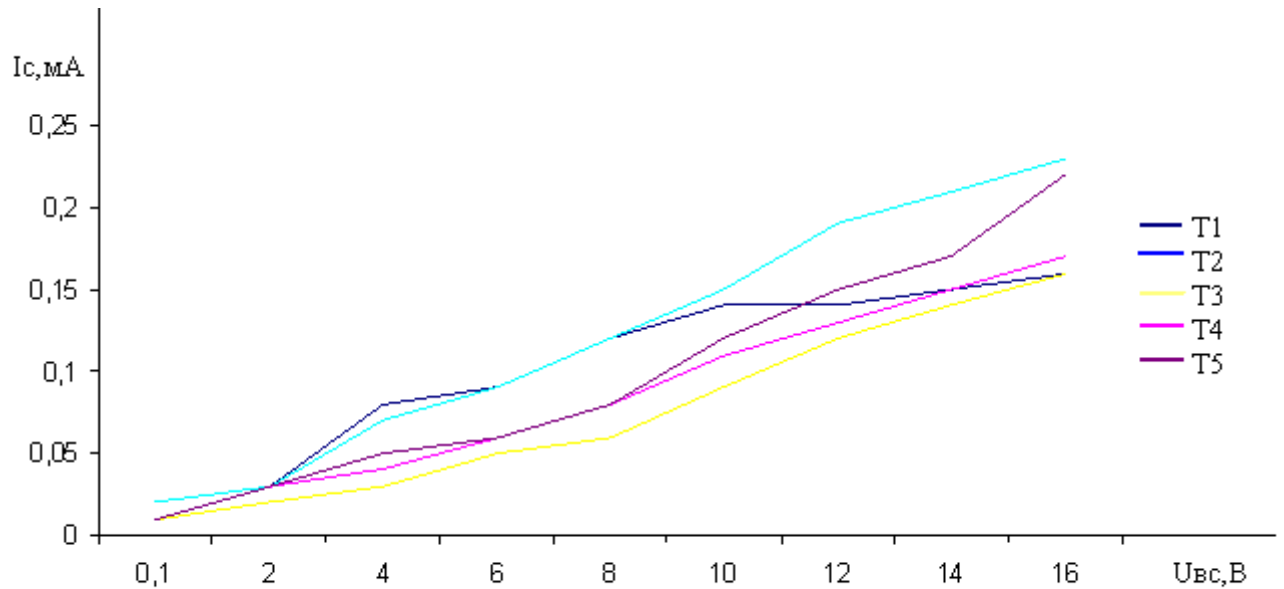


Рисунок 4.1 – Залежність струму стоку від напруги витік - стік

Також будується графік залежності струму стоку (I_c) від напруги затвор - стік ($U_{зс}$):

Таблиця 4.2 - Дані для побудови залежності струму стоку від напруги затвор - стік

Uвс, В	0,1	2	4	6	8	10	12	14	16
Ic₁, mA	1,32	1,19	0,99	0,85	0,64	0,51	0,32	0,19	0,11
Ic₂, mA	1,37	1,22	1,02	0,96	0,65	0,54	0,35	0,23	0,15
Ic₃, mA	1,68	1,53	1,41	1,21	0,98	0,79	0,56	0,37	0,31
Ic₄, mA	1,95	1,69	1,51	0,39	1,15	0,99	0,67	0,54	0,43
Ic₅, mA	4,97	1,65	1,49	1,29	0,98	0,76	0,64	0,59	0,48

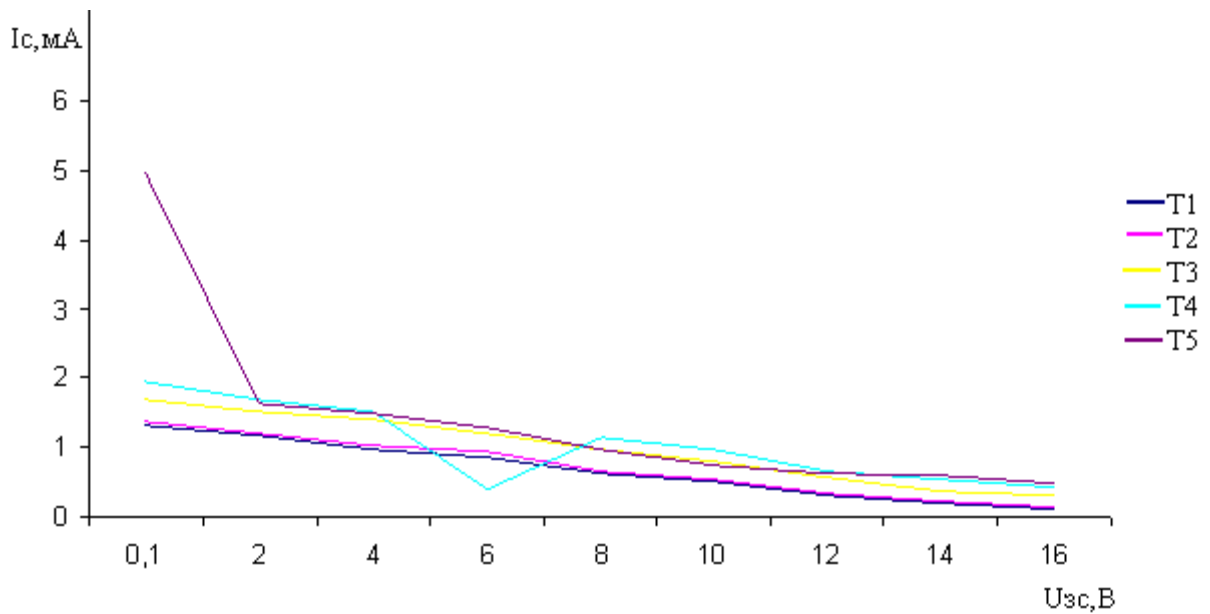


Рисунок 4.2 - Залежність струму стоку від напруги затвор - стік

Для дослідження та побудови характеристик необхідно провести моделювання в програмному середовищі Electronic Workbench.

У бібліотеці компонентів програми EWB польові транзистори з керуючим р-п переходом подані двома зразками: n-канальним і р- канальним та показані на рис. 5.12 а і б відповідно, де 1 — затвор (gate)- керуючий електрод; 2 - витік (source) — електрод, від якого починають рух основні носії заряду (у першому варіанті — електрони, у другому — дірки); 3 — стік (drain) - електрод, що приймає ці носії.

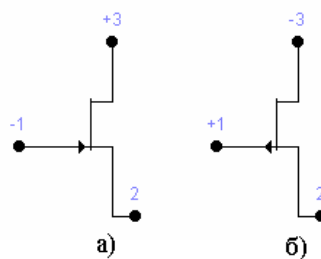


Рисунок 4.3- Польові n-канальні (а) і р- канальні (б) транзистори з керуючим р-п переходом

Параметри моделей польових транзисторів задаються за допомогою діалогового вікна .

- Напруга відсічки, В (Threshold voltage V_{TO} [V_{TO}]) — напруга між затвором і витоком польового транзистора з р-п переходом чи з ізовольованим затвором, що працюють у режимі збіднення, при якому

струм стоку досягає заданої низької напруги. Для транзисторів з ізольованим затвором, що працюють у режимі збагачення, цей параметр називається граничною напругою.

- Коефіцієнт пропорційності, A/B^2 (Transconductance coefficient A [KP]).
- Параметр модуляції довжини каналу, $1/B$ (Channel-length modulation $\ln[LAMB-DA]$).
- Об'ємний опір області стоку, Ом (Drain ohmic resistance R_d [RD]).
- Об'ємний опір області витоку, Ом (Source ohmic resistance R_s [RS]).
- Струм насичення р-п переходу, А (Gate-junction saturation current I_s [IS]), тільки для польових транзисторів з р-п переходом.
- Ємність між затвором і стоком при нульовому зсуві, Ф (Zero-bias gate drain junction capacitance C_{gd} [CGD]).
- Ємність між затвором і витоком при нульовому зсуві, Ф (Zero-bias gate source junction capacitance C_{gs} [CGS]).
- Контактна різниця потенціалів р-п переходу, В (Gate junction potential ρ_b [PB]) – тільки для польових транзисторів з р-п переходом.

За аналогією з біполярними транзисторами розрізняють три схеми увімкнення польових транзисторів: із загальним затвором (ЗЗ), із загальним витоком (ЗВ) і з загальним стоком (ЗС). Для дослідження ряду вихідних ВАХ польового транзистора в схемі ЗС може бути використана схема рис. 5.14. Вона містить: джерело напруги затвор-виток U_g , досліджуваний транзистор VT, джерело живлення U_{cc} , вольтметр U_d для контролю напруги стік-джерело й амперметр I_d для виміру струму стоку. Вихідна ВАХ знімається при фіксованих значеннях U_g шляхом зміни напруги U_d і виміру струму стоку I_d . Напруга U_g , при якій струм I_d має близьке до нуля значення, називається напругою відсічки. Маючи характеристики $I_d=f(U_d)$, можна визначити крутизну $S=dI_d/dU_g$, що є однією з найважливіших характеристик польового транзистора як підсилювального приладу.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

Класифікація, структура та принцип дії польових транзисторів з ізольованим затвором

Вихідні дані для розрахунків:

$Z_k=1500 \cdot 10^{-4}$ см — ширина н/п структури;

$L_k=6 \cdot 10^{-4}$ см — довжина каналу;

$d=0,16 \cdot 10^{-4}$ см — товщина оксидного шару (ізолятора затвору);

$N_a=6 \cdot 10^{15}$ см⁻³ — концентрація акцепторів у підкладці;

$N_{\text{пов}}=1,2 \cdot 10^{11}$ см⁻² — поверхнева щільність зарядів;

$h_c=4 \cdot 10^{-4}$ см — товщина стоку;

$L_c=7 \cdot 10^{-4}$ см — довжина стоку;

$h_b=4 \cdot 10^{-4}$ см — товщина витоку;

$L_b=7 \cdot 10^{-4}$ см — довжина витоку;

$R_t=40$ К/Вт — тепловий опір корпусу;

$U_3 = -5,6 \dots -15,6$ В - напруга на затворі;

$U_{\text{пор}} = -1,8$ В - гранична напруга.

Розрахунок параметрів:

Напруга змикання, В:

$$U_{\text{см}} = \frac{qN_a L_k^2}{2\varepsilon\varepsilon_0} - L_k \sqrt{\frac{2qN_a \phi_f}{\varepsilon\varepsilon_0}} = 7,40 \cdot 10^{-2} - 3,71 \cdot 10^{-4} = 7,38 \cdot 10^{-2},$$

де q - заряд електрона;

$\phi_f = 0,38$ В — потенціал рівня Фермі.

Питома ємність « затвор-канал », Ф:

$$C_g = \frac{\varepsilon_g \varepsilon_0}{d} = \frac{4 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{0,16 \cdot 10^{-4}} = 2,21 \cdot 10^{-8},$$

де $\varepsilon_g = 4$ - діелектрична проникність діоксиду кремнію.

Ширина збідненого шару в каналі при $U_{\text{зи}} = 0$, м:

$$\delta = \sqrt{\frac{4\varepsilon\varepsilon_0 \phi_f}{qN_a}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 12 \cdot 8,85 \cdot 0,38 \cdot 10^{-12}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6 \cdot 10^{21}}} = 4,1 \cdot 10^{-7}.$$

Щільність заряду некомпенсованих іонізованих атомів домішки в підкладці Кл/см²:

$$Q_n = qN_a \delta = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6 \cdot 10^{15} \cdot 4,1 \cdot 10^{-5} = 3,9 \cdot 10^{-8}.$$

Щільність заряду на межі діелектрик-напівпровідник, Кл/см²:

$$Q_{\text{пов}} = qN_{\text{пов}} = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,2 \cdot 10^{11} = 1,92 \cdot 10^{-8}.$$

Крутизна, А/В:

$$S = \mu_n C_g \frac{Z_k}{2L_k} (U_{зи м} - U_{зи пор}) = 0,15 \cdot 10^4 \cdot 2,21 \cdot 10^8 \cdot 1500 \cdot 10^{-4} / 2 \cdot 6 \cdot 10^{-4} (15,6 - 1,8) = 3 \cdot 10^{12},$$

де $\mu = 0,15 \text{ м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ — рухливість електронів у каналі.

Коефіцієнт К:

$$K = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \mu Z_k}{2 d L_k} = \frac{8,85 \cdot 4 \cdot 10^{-12} \cdot 0,15 \cdot 10^4 \cdot 1500 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 0,16 \cdot 10^{-4} \cdot 6 \cdot 10^{-4}} = 0,41.$$

Паразитні ємності затвора, Ф:

$$C_{зс} = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S_з}{d} = \frac{1}{2} \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 4 \cdot 1500 \cdot 6 \cdot 10^{-8}}{0,16 \cdot 10^{-4}} = 0,99 \cdot 10^{-10},$$

де $S_з = Z_k \cdot L_k$ — площа затвора.

Опір стоку й витоку, Ом:

$$r_B = r_C = \frac{\rho_k L_H}{3 h_H Z_k} = \frac{4,2 \cdot 7 \cdot 10^{-4}}{3 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \cdot 1500 \cdot 10^{-4}} = 16,35,$$

де ρ_k — питомий опір каналу.

На рис. 5.1 подано ряд передавальних характеристик транзистора для значень напруги між витоком і стоком 1, 2, 4 В.

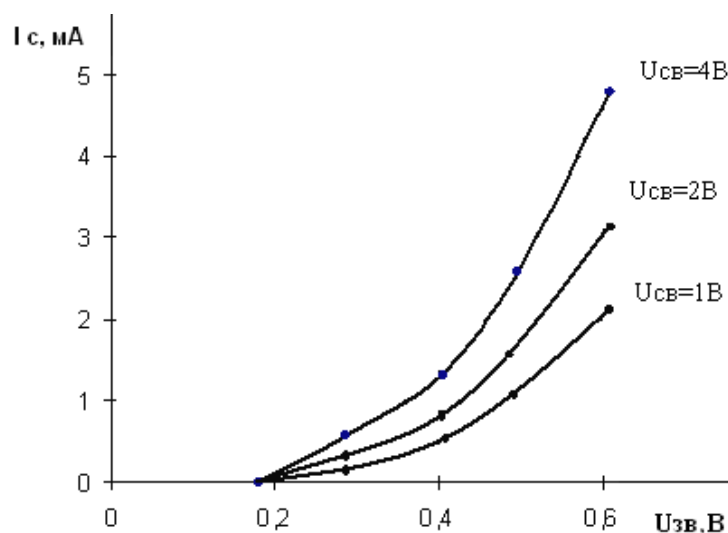


Рисунок 5.2- Передавальна характеристика польового транзистора

Таблиця 5.1- Дані для побудови ряду стокових характеристик МДН - транзистора

$U_{св}, В$	$I_{с}, А$	$I_{с}, А$	$I_{с}, А$
0	0.00	0.00	0.00
20	0.75	0.52	0.22
40	1.09	0.86	0.50
60	1.20	0.97	0.61
80	1.20	0.97	0.61
100	1.20	0.97	0.61
120	1.20	0.97	0.61
140	1.20	0.97	0.61
160	1.20	0.97	0.61
180	1.20	0.97	0.61
200	1.20	0.97	0.61
$U_{зв} =$	6 В	3 В	0 В

Ряд вихідних характеристик МДН - транзистора з індукованим каналом будується шляхом сполучення двох областей його ВАХ: тріодної й області насичення.

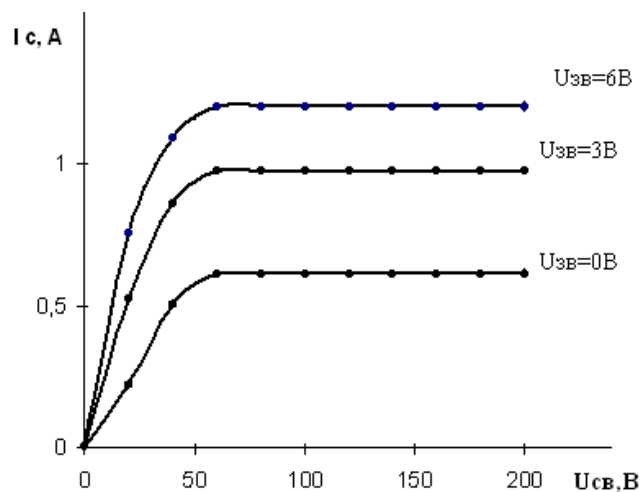
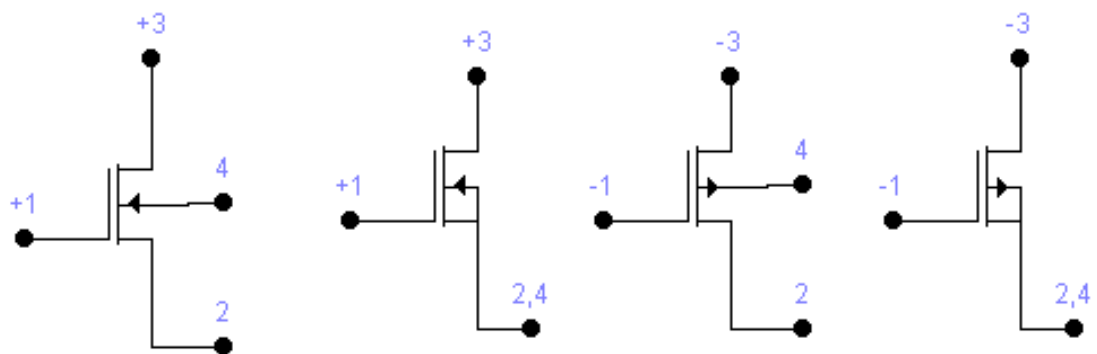


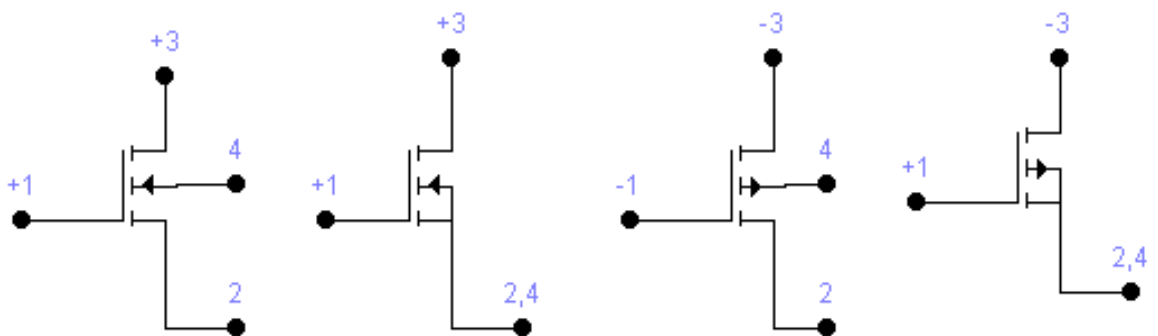
Рисунок 5.3 - Ряд вихідних вольт-амперних характеристик польового транзистора

Для дослідження та побудови характеристик необхідно провести моделювання в програмному середовищі Electronic Workbench.

У бібліотеці компонентів програми EWB МДН - транзистори з вбудованим каналом подані двома зразками: n-канальним та р- канальним, які попарно показані на рис.5.17а. Кожен тип МДН - транзисторів поданий у двох варіантах: з окремим виводом підкладки і з загальним виводом підкладки й витоку. Аналогічний вид мають позначення МДН - транзисторів з індуктованим каналом (рис. 5.17б).



а)



б)

Рисунок 5.4- МДН - транзистори з вбудованим (а) та індуктованим (б) каналами.

Для дослідження характеристик МДН - транзисторів використовується схема (рис. 5.5), за допомогою якої можна отримати ряд вихідних характеристик МДН - транзисторів при фіксованих значеннях напруги на затворі U_g і підкладці U_b . Маючи такі характеристики, можна визначити крутизну транзистора S при керуванні з боку затвора, а також крутизну при керуванні з боку підкладки $S_d = dI_d/dU_d$; статичний коефіцієнт підсилювача $M = U_d/U_g$, вихідний диференціальний опір $R_d = dU_d/dI_d$ та інші параметри.

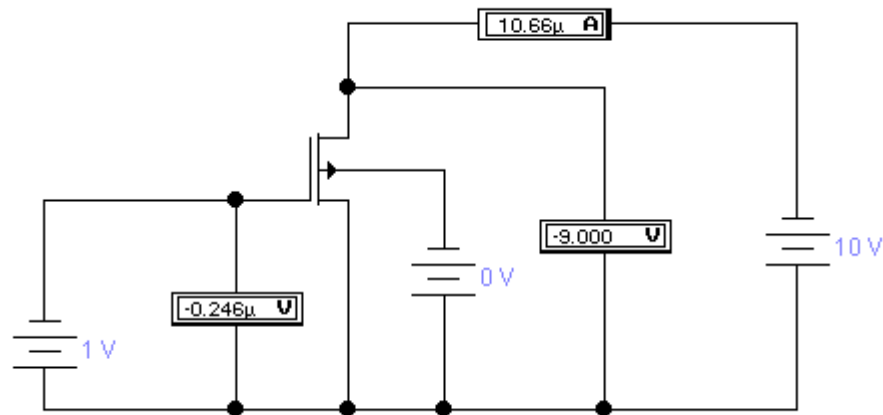


Рисунок 5.5- Схема для дослідження характеристик МДН - транзисторів.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

Дослідження принципу дії та основних характеристик напівпровідникового тиристора

Основні параметри

- Напруга ввімкнення ($U_{вкл}$) – це така напруга, при якій тиристор переходить у відкритий стан (від 10 до 2500В);
- Пряме падіння напруги на відкритому тиристорі ($U_{пр} = 0,5 \div 1В$);
- Струм ввімкнення $I_{вкл}$;
- Струм утримання – це анодний струм, при якому тиристор закривається
- $I_{утрим}$;
- Час вимкнення – це час, протягом якого закривається тиристор $I_{відкл}$;
- Максимально допустима швидкість наростання прямої напруги

$(d/dt)_{\max}$;

- Максимально допустима швидкість наростання прямого струму $(d/dt)_{\max}$;
- Час ввімкнення $t_{\text{вкл}}$;
- Час затримки t_z ;
- Керуючий струм відмикання – це струм, який необхідно подати, щоб тиристор відкрився без «коліна» $I_{\text{у від}}$;
- Керуюча напруга відмикання – це напруга, яку необхідно подати, щоб тиристор відкрився без «коліна» $U_{\text{у від}}$.
- Зворотний максимальний струм - це струм, обумовлений рухом неосновних носіїв заряду при подачі напруги зворотної полярності;
- Максимально допустимий прямий, середній за період струм.

Розрахунок параметрів диністора

Вихідні дані: матеріал-кремній

$$I_{\text{ср.}} = 0,2 \text{ А}$$

$$I_{\text{імп.}} = 2 \text{ А}$$

$$U_{\text{пр. відм.}} = 1,5 \text{ В}$$

$$U_{\text{зв.}} = 10 \text{ В}$$

$$I_{\text{утрим.}} = 3 \text{ мА}$$

Повторна імпульсна зворотна напруга ($U_{\text{зв.мак}}$) - це напруга, при якій відбувається електричний пробій. Для більшості тиристорів $U_{\text{вмик}} = U_{\text{зв.мак}}$.

$U_{\text{зв.мак}}$ визначається за формулою:

$$U_{\text{зв.мак}} = k \cdot \inf(U_{\text{пер}}, U_{\text{проб}}), \quad (6.1)$$

де \inf – менше із значень $U_{\text{пер}}$ і $U_{\text{проб}}$

$k = 0,8$ для вітчизняних силових приладів.

Знаючи $U_{\text{зв.мак}}$, можна визначити напругу перемикавання при мак допустимій температурі структури транзистора (125°C):

$$U_{i\ddot{a}d} = \frac{U_{\text{зд. макс.}}}{0,8} \quad . \quad (6.2)$$

За формулою 6.2 визначається $U_{\text{пер}}$ для приладу, вихідні дані якого відповідають диністору КН102А типу (подача на диністор зворотної напруги вище допустимої $U_{\text{зв. макс.}}$ може вивести його з ладу. Для всіх диністорів і $U_{\text{зв. макс.}}$ становить 10 В, при цьому струм $I_{\text{зв. макс.}}$ не перевищує 0,5 мА).

$$U_{i\ddot{a}d} = \frac{10}{0,8} = 12,5 \text{ В} \quad .$$

Щоб визначити товщину підкладки, необхідно розрахувати ширину об'ємного заряду W_{n0} при напрузі пробією:

$$W_{n0} = 0,52\sqrt{\rho U} \quad , \quad (6.3)$$

де ρ - питомий опір, Ом·см.

$$W_{n0} = 0,52\sqrt{4,5 \hat{\rho} \cdot \hat{n} \cdot 100 \hat{A}} = 11 \hat{W} \quad .$$

Для типових напівпровідників, що використовуються у виробництві, величина питомого опору знаходиться в діапазоні $\rho = (1 \div 10)$ Ом·см.

Таблиця 6.1- Дані розрахунку ширини об'ємного заряду

$W_{n0} = 0,52\sqrt{\rho U}$	5,2	7,35	9	10,4	11,63	12,74	13,76	14,71	15,6	16,4
ρ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Кремній, електронного типу провідності, легований фосфором, має питомий опір $\rho = 4,5$ Ом·см.

$$I = f(E_{\text{пр}}). \quad (6.3)$$

Струм ввімкнення усіх диністорів серії становить 5 мА.

Можна переконатися, що тиристор має S образну ВАХ. Для цього розрахунок ВАХ здійснюється за формулою:

$$U_A = U_1 - U_2 + U_3 \quad . \quad (6.4)$$

Прямі напруги U_1 й U_2 малі, так що можна приблизно при прямому ввімкненні вважати $U \approx U_2$.

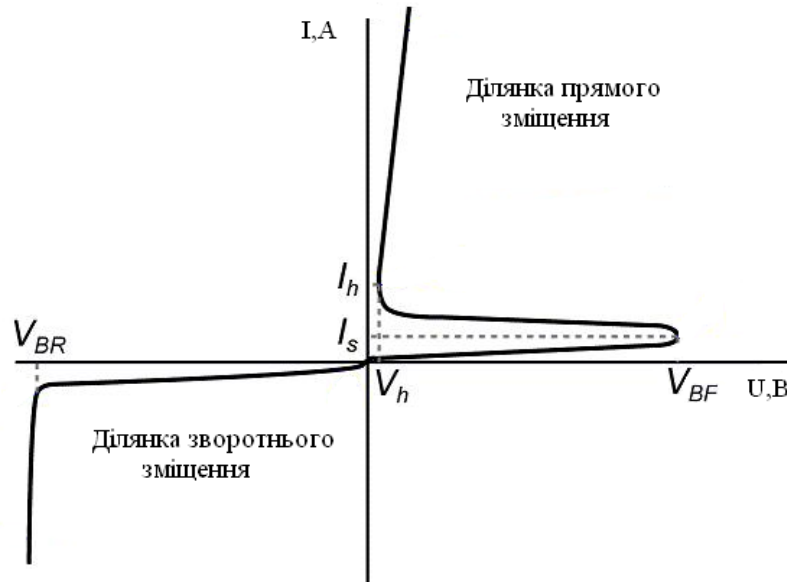






Рисунок 6.1 - Вольт - амперна характеристика диністора

Для дослідження та побудови характеристик необхідно провести моделювання в програмному середовищі Electronic Workbench.

Перемикаючі діоди із р-п-р-п- чи п-р-п-р- структурами — це тиристори. До класу тиристорів належать симетричні диністори (діаки), симетричні триністори (тріаки) і досить рідкий тип диністора — діод Шоклі, у якого структура р-п-р-п організована за рахунок наявності в р-п- переході пасток, сформованих шляхом легування. Позначення перемикаючих діодів, моделі яких є в програмі EWB:

-  діод Шоклі;
-  тиристори або диністори;
-  симетричний диністор або діак;
-  симетричний триністор або тріак.

Параметри, що задаються:

- Saturation current I_s [IS], A — зворотний струм диністора;
- Peak Off-state Current I_{drm} [IDRM], A — те саме, але для триністора;
- Switching voltage V_s [VS], B — напруга, при якій диністор перемикається у відкритий стан;
- Forward Breakover voltage V_{drm} [VDRM], B — те саме, але для триністора при нульовій напрузі на керуючому електроді;
- Peak On-State Voltage V_{tm} [VTM], B — спадання напруги у відкритому стані;
- Forward Current at which V_{tm} is measured I_{trn} [ITM], A — струм у відкритому стані;
- Turn-off time T_g [TG], c — час перемикання в закритий стан;
- Holding current I_h [IH], A — мінімальний струм у відкритому стані (якщо він менше встановленого, то прилад переходить у закритий стан);
- Critical rate of off-state voltage rise dv/dt [DV/DT], B/мкс — допустима швидкість зміни напруги на аноді триністора, при якому він продовжує залишатися в закритому стані (при більшій швидкості триністор відкривається);
- Zero-bias junction capacitance C_j [CJO], Ф — бар'єрна ємність диністора при нульовій напрузі на переході;
- Gate Trigger voltage V_{gt} [VGT], B — напруга на керуючому електроді відкритого триністора;

Дослідження прямої гілки ВАХ триністора можна проводити з використанням схеми (рис.6.9), де показані джерела входної напруги U_i і напруги керування U_y із захисними резисторами R_{zt} , R_{zy} . Вимір ВАХ здійснюється при вимірюванні U_i від нуля до $U_{drm} + 50$ при фіксованому значенні U_y , наприклад, у трьох точках $0,5V_d$, V_d і $1,5V_d$. При дослідженні зворотної гілки ВАХ змінюється тільки полярність U_i .

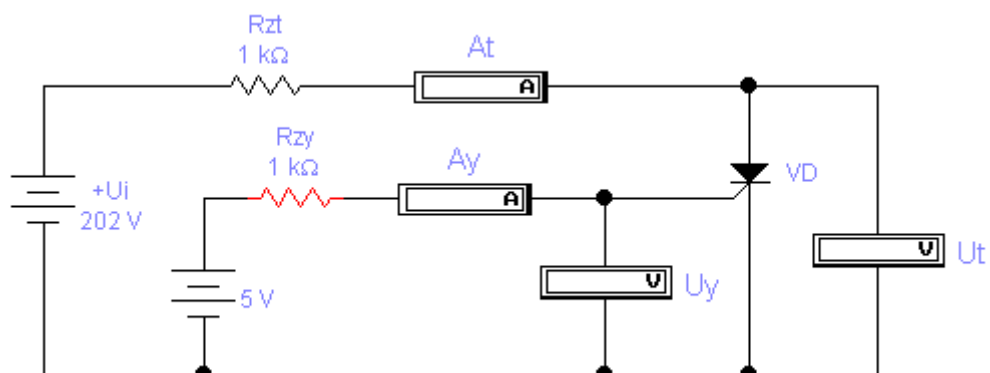


Рисунок 6.2- Схема дослідження тиристорів

Слід відзначити, що зняття ВАХ перемикаючих діодів може бути здійснене також і в режимі заданих струмів у силовому і керуючому ланцюзі, тобто за допомогою схем, наведених на рис. 6.10 та 6.11. Дослідження інших параметрів тиристора можливе за допомогою схеми рис. 6.12.

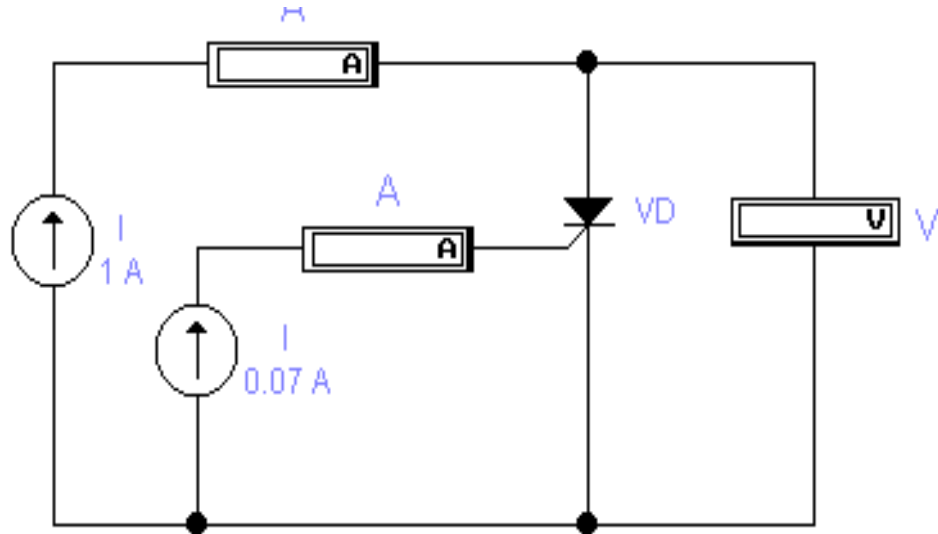


Рисунок 6.3- Схема для дослідження прямої гілки ВАХ тиристора при постійному струмі

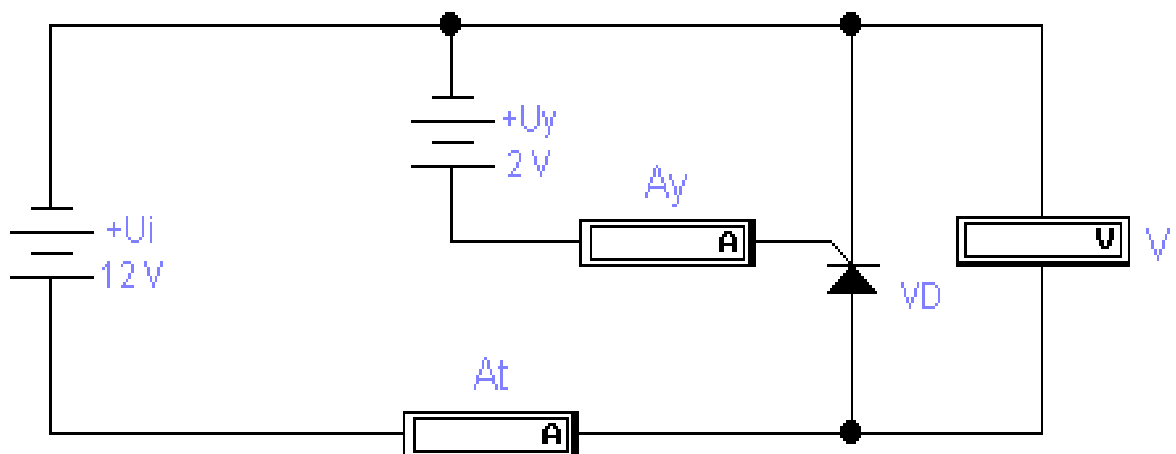


Рисунок 6.4- Схема для дослідження прямої гілки ВАХ тиристора

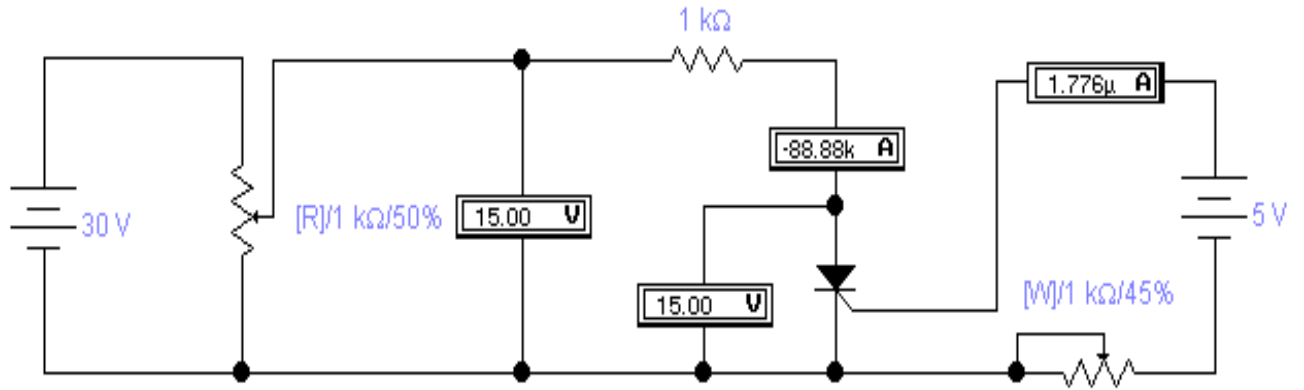


Рисунок 6.5- Схема для дослідження тиристора

ЛІТЕРАТУРА

1. Основи електроніки на базі схемотехнічного моделювання «Multisim»: Навчальний посібник / Б. І. Медведенко, Л. В. Коломієць, В. П. Квасніков, О. В. Грабовський. – Одеса.: Бондаренко М.О., 2015. – 370 с.
2. Панащевний Б. І., Свєргун Ю. Ф. Загальна електротехніка, теорія і практикум. — К.: Каравела, 2004.
3. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Електроніка і мікросхемотехніка. — К.: Каравела 2006.
4. Борисов О. В., Гусєв В. О., Якименко Ю. І. Твердотільна електроніка. — К.: Політехніка, 2004.
5. Прохоров Е.Д. Твердотіла електроніка : навч. посіб. Харків : ХНУ ім. В.Н.Каразіна, 2007, 1прим.
6. Матвійків М. Д. Елементна база електронних апаратів: Підручник / М. Д. Матвійків, В. М. Когут, О. М. Матвійків. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2007. – 428 с.
7. Ніконова З.А., Небєснюк О.Ю. Твердотіла електроніка : Для студ. напрямку "Електроніка" ЗДІА : Конспект лекцій. Запоріжжя : ЗДІА, 2002, 2прим.
8. Ніконова З.А., Швець Є.Я. Біомедична електроніка : Навч. посібник для вnz. Запоріжжя : ЗДІА, 2003, 105прим.
9. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум : Навч. пос. Київ : Каравела, 2003, 2 прим.
10. Панащенко М.В., Сєнько Є.В., Юрченко М.М. Електроніка і мікросхемотехніка : Аналогові та імпульсні пристрої : Підручник для вnz. Харків : ФОЛІО, 2002, 7 прим.
11. Матвійків М. Д. Елементи та компоненти електронних пристроїв: Підручник / М. Д. Матвійків , Б. С. Вус, О. М. Матвійків. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. – 496 с.
12. Основи технічної електроніки: У 2 кн. Кн.2. Схемотехніка: Підручник / В.І.Бойко, А.М. Гуржій, В.Я. Жуйков та ін. – К.: Вища шк., 2007. – 510 с.
13. Griffiths D. J. Introduction to Electrodynamics. — Addison Wesley, 2012. — 625 с. — ISBN 0-321-85656-2.
14. Zangwill A. Modern electrodynamics. — Cambridge University Press, 2013. — 977 с. — ISBN 978-0-521-89697-9.